

BfG-1710



Bericht

Untersuchung der Dynamik von Transportkörpern sowie deren Oberwasserabhängigkeit an ausgewählten Flussabschnitten der Tideelbe

BfG-SAP-Nr. : M39610305303
Seitenzahl : 41
Bearbeitung : Dipl.-Geol. Nicole Gehres
Dr.-Ing. Axel Winterscheid

Koblenz, 16. Mai 2011

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung oder eine Veröffentlichungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der Bundesanstalt für Gewässerkunde.

Inhaltsverzeichnis

1. Veranlassung und Zielstellung.....	7
2. Bisherige Untersuchungen zu Transportkörpern an der Tideelbe.....	9
3. Beschreibung der Untersuchungsgebiete Lühe und St. Margarethen	11
4. Methodik.....	15
4.1 Peildaten.....	15
4.2 Sedimenttransport	16
4.2.1 Allgemein	16
4.2.2 Transportkörper.....	17
4.3 Software Dune Tracking 2D	18
4.4 Genauigkeit der Auswertungen.....	21
5. Ergebnisse.....	22
5.1 Untersuchungsgebiet Lühe.....	22
5.1.1 Transportkörpergeometrie.....	22
5.1.2 Oberwasserabhängigkeit der Transportkörpergeometrie.....	22
5.1.3 Höhen-Längen Beziehung.....	23
5.1.4 Superposition.....	24
5.1.5 Dünenform und Transportrichtung.....	26
5.1.6 Migration und Geschiebetransport.....	28
5.2 Untersuchungsgebiet St. Margarethen	28
5.2.1 Transportkörpergeometrie.....	28
5.2.2 Oberwasserabhängigkeit der Transportkörpergeometrie.....	28
5.2.3 Höhen-Längen Beziehung.....	29
5.2.4 Superposition.....	30
5.2.5 Dünenform und Transportrichtung.....	30
5.2.6 Migration und Geschiebetransport.....	31
6. Diskussion und Schlussfolgerungen.....	35
6.1 Einfluss Oberwassersituation auf Wanderungsgeschwindigkeit und Transportrichtung der Dünen.....	35
6.2 Weitere klimasensitiven Einflussfaktoren.....	37
7. Ausblick.....	38
Danksagung	39
Literatur.....	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überblick über die untersuchten Transportkörperstrecken bei Lühe Elbe-km 644,9-646,05 (A) und bei St. Margarethen Elbe-km 685,5-689,8 (B) an der	12
Abbildung 2:	Querprofile durch die Tideelbe im Bereich der untersuchten Flussabschnitte bei Lühe (Profil A und B) und bei St. Margarethen (Profil C-E) (Datenquelle: WSA Hamburg).	13
Abbildung 3:	Salinität in Sohlnähe an der Dauermesstation D1 bei Elbe-km 643 (A) und.....	14
Abbildung 4:	Allgemeine Klassifikation der Komponenten des Feststofftransports (Vollmer & Schriever, 2005).	17
Abbildung 5:	Transportkörper, die durch 10 Messpunkte aufgelöst werden (Frings, 2010).	19
Abbildung 6:	Nur der rot umrandete Bereich im Untersuchungsgebiet St. Margarethen wurde mit der Software DT2D ausgewertet.	19
Abbildung 7:	Implementierter Auswertalgorithmus in der Software DT2D und gewählte.....	20
Abbildung 8:	Mittelwerte der Dimensionen aller ausgewerteten Dünen in den drei Bereichen nördlich, südlich und in der Mitte der Fahrrinne (Dünenhöhe A, Dünenlänge B).	22
Abbildung 9:	Zusammenhang zwischen Dünenlänge (A) bzw. Dünenhöhe (B) und dem Oberwasserabfluss.	23
Abbildung 10:	Höhen-Längen Beziehungen der Dünen bei Lühe. In schwarz und rot die von Flemming (1988) definierte Funktion für H_{max} und H_{mean}	24
Abbildung 11:	Screenshot eines Längsschnittes durch den gepeilten Bereich am 02. Juni 2009 09:20 Uhr mit feineren Einstellungen (1/1/5) (B) und gröberer Einstellungen (3/5/20) (A) für sampling interval, max. point deviation und loding distance.	25
Abbildung 12:	Versuch, die Dünen in Superposition zu erfassen. Vergleich der Auswertungen mit den Einstellungen 3/5/20 (rot) und den Einstellungen 1/1/5 (schwarz).	25
Abbildung 13:	Screenshot des Längsschnittes durch den gepeilten Bereich (40 m nördlich der Mitte). A: 02. Juni 2009 09:20 Uhr und B: 02. Juni 2009 15:20 Uhr.	26
Abbildung 14:	Screenshot eines Längsschnittes durch den gepeilten Bereich (40 m nördlich der Mitte). A: 04. Juni 2009 07:35 Uhr und B: 05. Juni 2009 07:35 Uhr	27
Abbildung 15:	Längsprofile (Loding 0.00) zu drei verschiedenen Zeitpunkten durch den gepeilten Bereich im Untersuchungsgebiet Lühe.	27
Abbildung 16:	Mittelwerte der Dimensionen der Dünen in den Bereichen nördlich, südlich.....	28
Abbildung 17:	Beziehung zwischen Oberwasserabfluss bei Neu Darchau und der Dünenlänge (A) sowie der Dünenhöhe (B) im Untersuchungsgebiet St. Margarethen.....	29
Abbildung 18:	Längen-Höhen-Beziehungen der Dünen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen. In schwarz und rot die von Flemming (1988) definierte Funktion für H_{max} und H_{mean}	30

Abbildung 19:	Screenshot eines Längsschnittes durch den gepeilten Bereich (60 m nördlich der Mitte des gepeilten Streifen). A: 01. März 2010 und B: 28. April 2010.....	31
Abbildung 20:	Screenshot eines Längsschnittes durch den gepeilten Bereich (180 m südlich der Mitte des gepeilten Streifen). A: 30. Juni 2010 und B: 12. Juli 2010.....	31
Abbildung 21:	Migration der Dünen in Meter pro Tag Richtung Nordsee über den gepeilten Streifen der ungefähr der Fahrrinne entspricht (0~Fahrinnenmitte) in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses bei Neu Darchau.	32
Abbildung 22:	Durchschnittliche Migration in Richtung Nordsee in m pro Tag für die südliche und die nördliche Hälfte des gepeilten Streifen.....	33
Abbildung 23:	Geschiebetransport in m ³ pro Tag in der Fahrrinne im Untersuchungsgebiet St. Margarethen in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses bei Neu Darchau.....	33
Abbildung 24:	Summe der Tagesfrachten (Transport durch nicht erfasste, kleine Dünenstrukturen in Superposition ist in der Summe der Tagesfrachten nicht enthalten) in der Fahrrinne bei St. Margarethen berechnet mit Hilfe der Abflussganglinie bei Neu Darchau aus 2009 und 2010.	34
Abbildung 25:	Dünenmigration in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses bei Neu Darchau aus den eigenen Auswertungen und aus Literatur von Nasner (1974) und Zorndt (2009).....	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ausgewählte Datensätze der Transportkörperstrecke Lühe zwischen.....	16
Tabelle 2:	Ausgewertete Peildatensätze der Transportkörperstrecke St. Margarethen zwischen Elbe-km 685,5 und 689,8 sowie die dazugehörigen Oberwasserabflüsse bei Neu Darchau und Tidephasen zum Zeitpunkt der jeweiligen Peilung.....	16

1. Veranlassung und Zielstellung

Das Forschungsprogramm KLIWAS „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - Entwicklungen von Anpassungsoptionen“ wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) initiiert. Dabei arbeiten circa 80 Wissenschaftler der vier Oberbehörden des BMVBS (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Deutscher Wetterdienst, Bundesanstalt für Wasserbau) in 30 Projekten an den Folgen des Klimawandels für Wasserstraßen und Schifffahrt und entwickeln entsprechende Anpassungsoptionen. Ziel ist es einerseits, die Leistungsfähigkeit dieses Verkehrsträgers zu sichern, und andererseits, die Gewässerqualität und die Lebensräume in den Flüssen und an den Küsten zu erhalten (KLIWAS, 2010). Der Forschungsverbund wird das BMVBS hinsichtlich des Sektors Schifffahrt und Wasserstraße beraten und Beiträge für die deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel leisten.

Im Projekt 3.03 des Forschungsprogramms KLIWAS wird der Einfluss klimabedingter Änderungen auf den Sedimenthaushalt und die Morphodynamik der deutschen Nordseeästuare von Elbe, Ems und Weser untersucht. Ästuare sind dynamische Systeme, und es gibt eine Vielzahl von Sedimenttransportprozessen und naturräumlichen Randbedingungen, die Einfluss auf den Sedimenthaushalt eines Ästuars nehmen. Das Wissen über die Prozesse im Einzelnen sowie das gesamte Wirkungsgefüge ist unvollständig und mit großen Unsicherheiten behaftet. In diesem Bericht wird ein Sedimenttransportprozess, nämlich der sohlgebundene Sedimenttransport von ästuarinen Transportkörpern am Beispiel der Tideelbe, beschrieben. Ausgewertet werden Geometrie, Transportrichtung und Wandergeschwindigkeit der Transportkörper sowie der mögliche Einfluss, den Klimaänderung auf diesen ästuarinen, transportkörpergebundenen Geschiebetransport an der Gewässersohle haben können. Im besonderen Fokus der Untersuchungen steht der Einflussfaktor „Oberwasserzufluss“. Der Zusammenhang zwischen Oberwasserzufluss und Transportkörperdynamik stellt darüber hinaus einen allgemeinen Beitrag zum Systemverständnis der Tideelbe dar. Neben den eigenen Untersuchungen an Transportkörperstrecken zwischen Elbe-km 644,9 und 646,05 sowie Elbe-km 685,5 und 689,8 werden die Ergebnisse weiterer Studien zur Transportkörperdynamik der Tideelbe zusammengefasst und mit den eigenen Untersuchungsergebnissen in Kontext gesetzt.

Insbesondere ist folgende Hypothese zu verifizieren:

Zwischen Geometrie, Transportrichtung und Wandergeschwindigkeit der großen Transportkörper (10 - 100 m Länge) und dem Oberwasserabfluss am Pegel Neu Darchau besteht ein erkennbarer Wirkungszusammenhang. Je höher der Oberwasserabfluss desto schneller wandern die Transportkörper stromab in Richtung Nordsee. Bei Unterschreitung eines standortspezifischen Grenzabflusses am Pegel Neu Darchau kehrt sich die Transportrichtung der Transportkörper um, so dass sie stromaufwärts in Richtung Hamburger Hafen wandern.

Zusätzlich zur Prüfung der oben aufgeführten Hypothese wird in diesem Bericht auch die Genauigkeit des hier angewandten Verfahrens mit der Software Dune Tracking 2D, im Folgenden als DT2D bezeichnet, bewertet.

2. Bisherige Untersuchungen zu Transportkörpern an der Tideelbe

In Nasner (1974) sind ausführliche Auswertungen zu Transportkörpern aus dem Tidegebiet der Elbe und Weser beschrieben. Der nachfolgende Absatz fasst die wichtigsten Untersuchungsergebnisse zusammen. Nasner kam zu der Schlussfolgerung, dass sich Transportkörper in diesen beiden Ästuaren nur bilden, wenn das Sohlsediment weniger als 15 % der Kornfraktion Schluff enthält. Des Weiteren hat Nasner in seinen Untersuchungen festgestellt, dass je ungleichförmiger das vorliegende Sohlsediment ist, desto stärker streuen die Transportkörperabmessungen. Auch untersuchte er den Einfluss des Tidestromrhythmus auf die Umorientierung der Transportkörper und konnte lediglich im Kammbereich Formveränderungen erkennen. Er hat beobachtet, dass die Neigungsverhältnisse der größeren Transportkörper Hinweise auf die Nettotransportrichtung liefern. Hinsichtlich eines möglichen Einflusses von Klimawandel auf den Sedimenthaushalt und die Morphodynamik ist es von Interesse, dass die Untersuchungen von Nasner ergeben haben, dass Sturmzeiten und Änderungen der Wassertemperatur keinen nennenswerten Einfluss auf die Transportkörperdynamik haben. Nach Baggermaßnahmen regenerieren sich die Transportkörperbereiche schnell. Die wesentlichen Einflussgrößen auf das Verhalten von Transportkörpern sind das Sohlsediment und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und in diesem Zusammenhang der Oberwasserabfluss. Bei zunehmenden Strömungsgeschwindigkeiten werden die Transportkörperhöhen geringer. Die Untersuchungen von Nasner an der Tideelbe von Elbe-km 624,4 bis 624,7 ergaben durchschnittliche Transportkörperhöhen von 1,15 m und durchschnittliche Transportkörperlängen von 21,5 m. Bei mittleren Oberwasserabflüssen, gemessen am letzten binnenseitigen Pegel bei Neu Darchau, beobachtete Nasner hohe, fast symmetrische Transportkörper, die sich kaum fortbewegten. Bei höherem Oberwasser über 750 m³/s wurden die Transportkörper asymmetrisch und flacher und verlagerten sich in Ebbestromrichtung mit Geschwindigkeiten von bis zu 30 cm am Tag. Bei Oberwasserabflüssen kleiner 750 m³/s bewegten sich die Transportkörper mit bis zu 5 cm pro Tag in Flutstromrichtung.

Möhl (1996) führte Untersuchungen zu Transportkörpern in der Tideelbe bei Elbe-km 634 durch. Die von Möhl beobachteten Transportkörper erreichten durchschnittliche Höhen von 3 m und Längen zwischen 40 und 70 m. Aus der Symmetrie der Transportkörper hat Möhl in seinen Untersuchungen eine Flutstromorientierung abgeleitet. Eine deutliche resultierende Wandergeschwindigkeit der einzelnen Formen konnte er aber nicht bestimmen. Auch er hat im zeitlichen Verlauf des Tidestromrhythmus keine komplette Umorientierung der Transportkörper vorgefunden. Da Möhl die Transportkörper bei gleichbleibenden Oberwasserabflüssen um 500 m³/s untersucht hat, konnte er keine Aussagen zu einer Oberwasserabhängigkeit in Bezug zu Transportrichtung und Wandergeschwindigkeiten treffen.

Vollmers und Wolf (1969) untersuchten zwischen Elbe-km 642 und 647 Transportkörper mit Höhen zwischen 2,2 und 2,5 m. Bei Oberwasserabflüssen von $700 \text{ m}^3/\text{s}$ stellten sie eine Wandergeschwindigkeit der Transportkörper von 4 m pro Monat und bei Oberwasserabflüssen von $1660 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Wandergeschwindigkeit von 20 m pro Monat in Richtung Nordsee fest. Vollmers und Wolf (1969) beobachteten, dass mit steigenden Oberwasserabflüssen am Pegel Neu Darchau und damit höheren Ebbstromgeschwindigkeiten die Transportkörperhöhen abnahmen.

Eine aktuelle Studie über die Dynamik von Transportkörpern in der Tideelbe zwischen Elbe-km 636 und 639 stammt von Zorndt (2009). In dieser Arbeit hat Zorndt Fächerecholotpeilungen aus dem Zeitraum zwischen 1995 und 2009 ausgewertet. Sie detektierte im Untersuchungszeitraum Transportkörper mit einer durchschnittlichen Höhe von 1,7 m und einer durchschnittlichen Länge von 46,5 m. Bei den Sohlsedimenten handelte es sich um eng gestufte Mittelsande. Für den Untersuchungszeitraum berechnete Zorndt eine mittlere Wandergeschwindigkeit von 7 cm pro Tag stromauf, woraus sie einen Geschiebetransport über die gesamte Fahrrinne von 7400 m^3 pro Jahr abschätzte. Stieg der Oberwasserabfluss auf über $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Neu Darchau, so setzte eine Umkehr der Wanderrichtung der Transportkörper in Richtung Nordsee ein. Bei Abflüssen kleiner $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ wiesen die Transportkörper eine Flutstromorientierung auf (Zorndt, 2009).

3. Beschreibung der Untersuchungsgebiete Lühe und St. Margarethen

Die Elbe ist ein mitteleuropäischer Fluss, dessen Quellgebiet im Riesengebirge (1384 m ü. NN) liegt. Bis zu ihrer Mündung in die Nordsee bei Cuxhaven legt die Elbe einen Weg von 1091 km zurück. Das 148.268 km² große Einzugsgebiet der Elbe hat Anteile an der Bundesrepublik Deutschland (96 932 km²), an der Tschechischen Republik (50 176 km²), an Österreich (920 km²) und an der Republik Polen (240 km²). Die Fließgewässerkilometrierung erfolgt in Deutschland von der tschechischen Grenze (Elbe-km 0) bis zur Mündung (BfG, 2004). Am Wehr Geesthacht beginnt der letzte Abschnitt, die gezeitenbeeinflusste Unterelbe oder auch Tideelbe genannt. Die Fließstrecke zwischen dem Wehr bei Geesthacht bis Cuxhaven beträgt ungefähr 140 km.

Das Einzugsgebiet der Elbe liegt im Übergangsbereich zwischen dem maritim geprägten Klima Westeuropas und dem kontinentaleren Klima Osteuropas. Höhere Oberwasserabflüsse treten durch die Kombination von Niederschlagsereignissen und Schneeschmelze in den Mittelgebirgslagen vornehmlich im Winter und im Frühjahr auf. Winterliche Hochwasserwellen werden durch die zyklonale Tätigkeit, sommerliche Hochwasserwellen dagegen (z.B. das Hochwasser 2002) durch Tiefdruckgebiete, die feuchtwarme Luft aus dem Mittelmeerraum nach Norden transportieren (Vb Wetterlagen), ausgelöst. Ab dem Ausgang des 19. Jahrhunderts und vor allem in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden im Elbe-Einzugsgebiet Talsperren, Rückhaltebecken und Staustufen errichtet. Diese führen nach Berechnungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost nicht nur zu einer deutlichen Verringerung der Abflussspitzen, sondern beeinflussen auch die Feststoffführung der Gewässer (BfG, 2004). Der langjährige mittlere Abfluss (1926-2003) der Elbe am Pegel Neu Darchau, der als repräsentativ für den Abfluss über das Wehr bei Geesthacht angenommen werden kann, beträgt 713 m³/s (DGJ, 2003).

Das erste Untersuchungsgebiet Lühe liegt im Bereich der Tideelbe zwischen Elbe-km 644,9 und 646,05 stromab der Stadt Wedel (Abbildung 1 A). Das Untersuchungsgebiet St. Margarethen liegt weiter stromab zwischen Elbe-km 685,5 und 689,8 (Abbildung 1 B). Im Untersuchungsgebiet Lühe setzen sich die Sohlsedimente im Fahrrinnenbereich hauptsächlich aus der Fein- und Mittelsandfraktion mit einem geringeren Anteil an der schluffigen Fraktion zusammen. Die Sohlsedimente im Fahrrinnenbereich im zweiten Untersuchungsgebiet St. Margarethen zwischen Elbe-km 685,5 und 689,8 bestehen aus enggestuften Sanden.

Das Untersuchungsgebiet Lühe liegt in einem Kurvenbereich. Das nördliche Ufer ist der Gleithang, das südliche der Prallhang. Die Gewässerbreite, gemessen als Distanz zwischen MThw-Linie zu MThw-Linie, beträgt circa 2 km (Abbildung 2, A-B). Im Untersuchungsgebiet St. Margarethen bildet das nordöstliche Ufer den Prallhang, das südwestliche Ufer den Gleithang (Abbildung 2, C-E). Der Abstand der MThw-Linien beträgt im Profil E ungefähr 2,6 km, im Querprofil C und D nur circa 2 km.

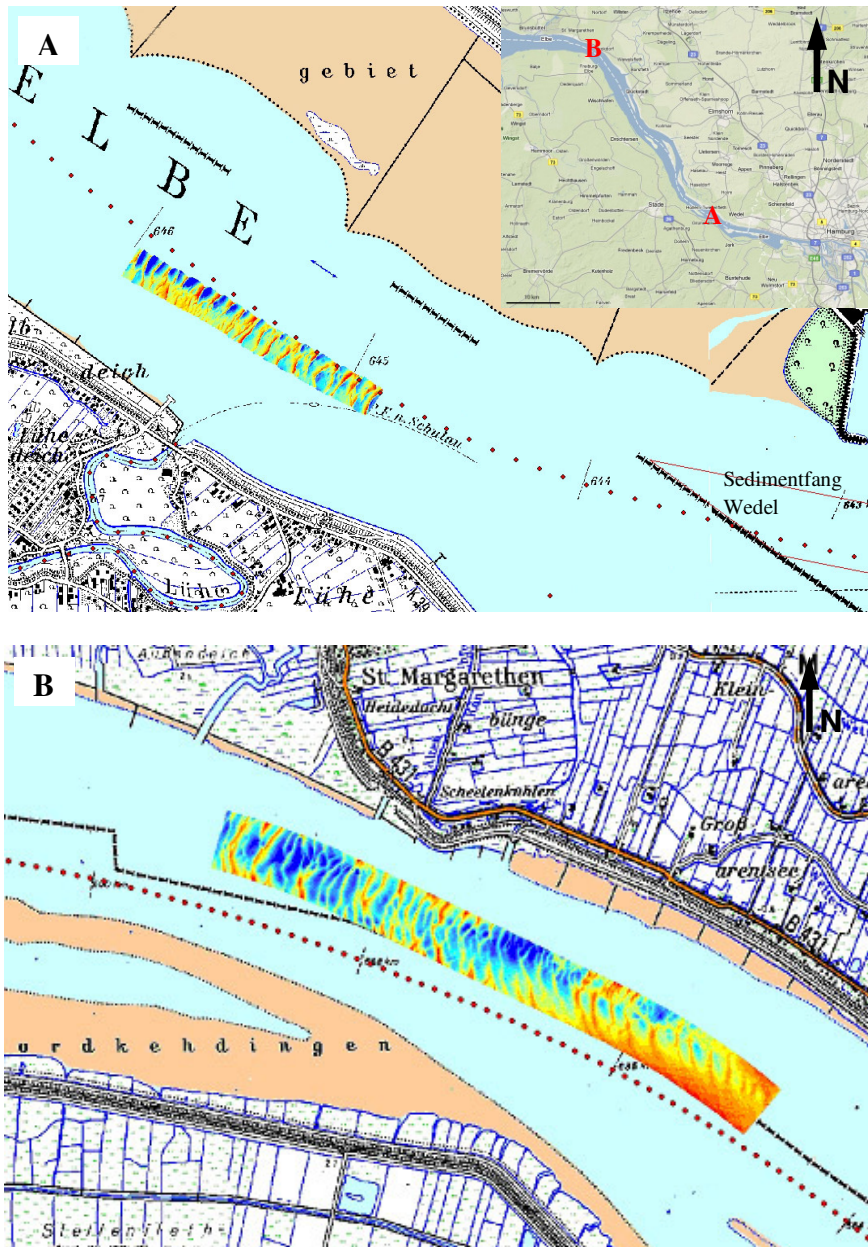


Abbildung 1: Überblick über die untersuchten Transportkörperstrecken bei Lütten Elbe-km 644,9-646,05 (A) und bei St. Margarethen Elbe-km 685,5-689,8 (B) an der Tidelbe.

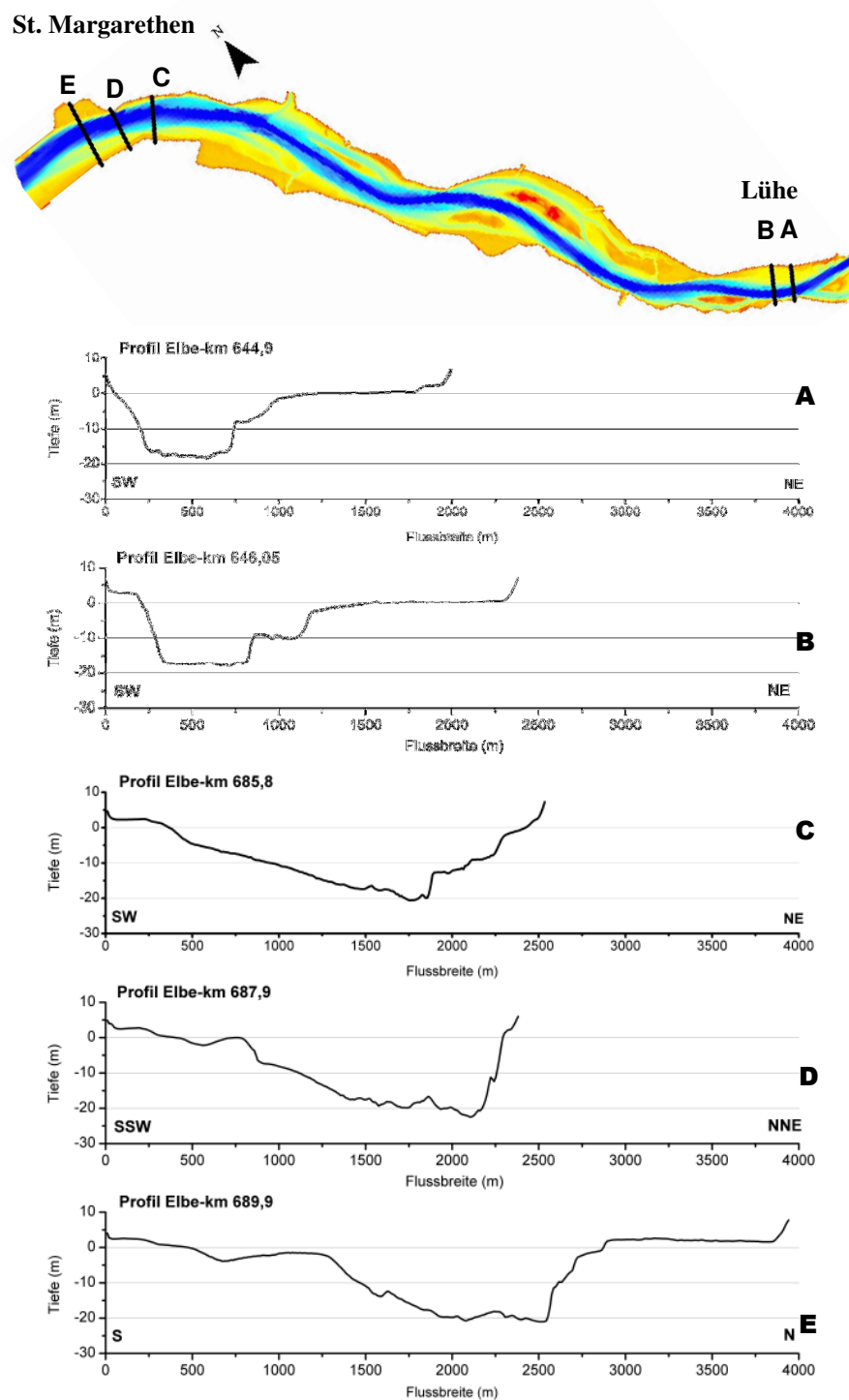


Abbildung 2: Querprofile durch die Tideelbe im Bereich der untersuchten Flussabschnitte bei Lühe (Profil A und B) und bei St. Margarethen (Profil C-E) (Datenquelle: WSA Hamburg).

Der Oberwasserabfluss, gemessen am letzten binnenseitigen Pegel der Elbe bei Neu Darchau, ist in Abbildung 3 zusammen mit der Salinität an den Dauermessstationen D1 (Elbe-km 643) und D4 (Elbe-km 676,3) dargestellt. Im Zeitraum der Peilungen im Untersuchungsgebiet Lühe liegt der Oberwasserabfluss bei circa 500 m³/s und die Salinität im Bereich von

Süßwasser mit $< 0,5 ‰$. Für den Zeitraum der Untersuchungen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen erreicht der Oberwasserabfluss bei Neu Darchau am 10. März 2010 sein Maximum mit $1887 \text{ m}^3/\text{s}$ und sein Minimum am 22./23. Juli 2010 mit $270 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Salinität schwankt in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses bei Neu Darchau. Ist der Oberwasserabfluss gering, wird eine Salinität von über $2,5 ‰$ erreicht, bei hohem Oberwasserabfluss kann die Salinität bis auf unter $0,5 ‰$ zurückgehen.

Die unmittelbar an die Fahrrinne angrenzenden Bereiche entlang des Untersuchungsgebiets St. Margarethen werden durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA Hamburg) als wichtiger Bereich für die Umlagerung von Baggergut genutzt. Das hier umgelagerte Baggergut ist in der Regel schluffig mit Feinsandanteilen und geringen Grobkornanteilen. Die Feinsedimente verdriften weiträumig, während vermutet wird, dass die im Baggergut enthaltenen Anteile an Grobsedimenten in die Fahrrinne eintreiben und dort möglicherweise für das vom WSA Hamburg beobachtete Anwachsen der Dünenstrukturen mitverantwortlich sind (vgl. BfG, 2010).

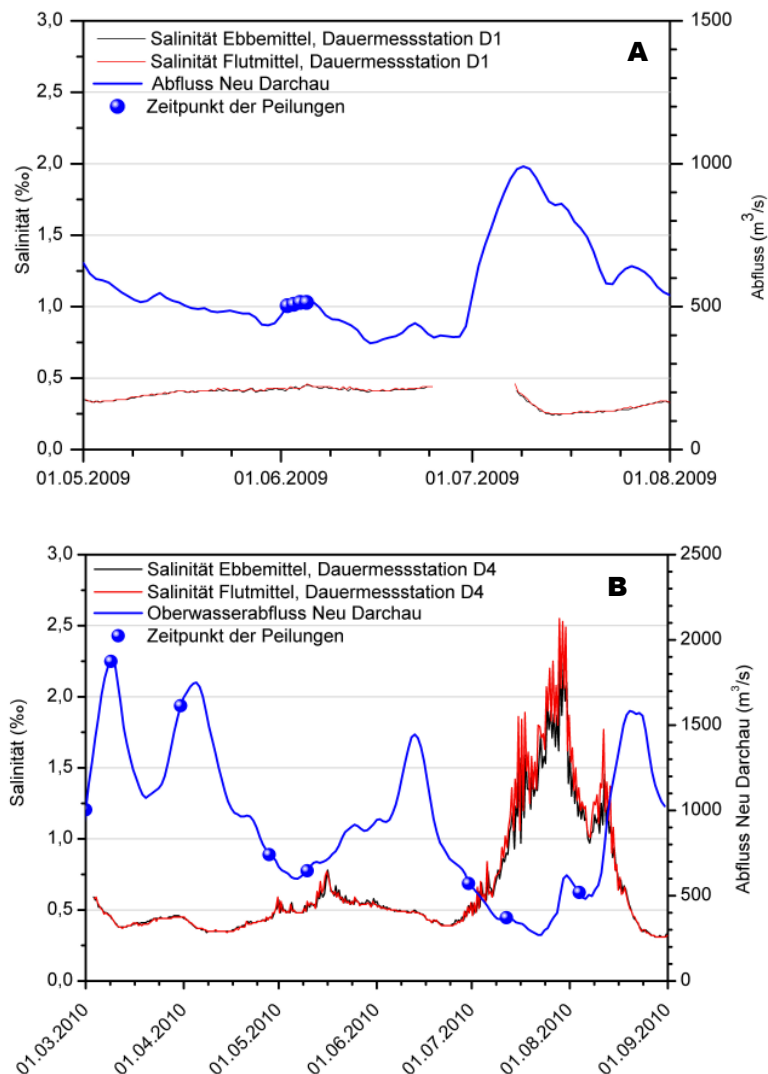


Abbildung 3: Salinität in Sohlhöhe an der Dauermessstation D1 bei Elbe-km 643 (A) und D4 bei Elbe-km 676,3 (B) sowie der Oberwasserabfluss bei Neu Darchau (blau).

4. Methodik

4.1 Peildaten

Das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA Hamburg) hat im Fahrrinnenbereich des Untersuchungsgebietes Lühe mehrjährig, ein- bis zweimal täglich Peilfahrten bei verschiedenen Tidephasen durchgeführt. In dieser Arbeit werden aus diesem Gesamtdatensatz sieben Peildatensätze, aufgenommen an vier aufeinanderfolgenden Tagen im Zeitraum vom 02. bis 05. Juni 2009, ausgewertet (Tabelle 1). Der durch die Peilung erfasste Bereich erstreckt sich über eine Länge von 1128 m und eine Breite von 135 m.

Im stromabwärts gelegenen Untersuchungsgebiet St. Margarethen werden acht Peildatensätze ausgewertet, die vom WSA Hamburg erfasst und zur Verfügung gestellt wurden. Die Peilungen fanden zwischen dem 01. März 2010 und dem 04. August 2010 alle ein bis drei Wochen bei verschiedenen Oberwassersituationen und Tidephasen statt (Tabelle 2). Die Peilungen wurden zwischen Elbe-km 685,5 und 689,8 im Bereich der Fahrrinne über eine Länge von 4300 m und eine Breite von 450 m durchgeführt.

Sämtliche Peilungen wurden mit einem Flachwasserecholot der Firma Kongsberg (EM 3002) ausgeführt. Das Echolotsystem besteht aus einem Schwinger, der während der Peilung als Sender und Empfänger fungiert. Der Schwinger sendet einen akustischen Impuls aus (200-300 kHz), welcher an der Gewässersohle reflektiert und wieder vom Schwinger aufgezeichnet wird (Kongsberg Maritime GmbH, 2011). Mit der gemessenen Laufzeit und der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Impulses im Wasser wird die Wassertiefe ermittelt. Fächerecholote senden quer zur Bewegungsrichtung des Schiffes mehrere Impulse gleichzeitig aus. Die Breite des abgetasteten Streifens ist dabei abhängig vom Öffnungswinkel des Impulses und der Wassertiefe (Wenz, 2008). Für jede Peilung müssen satellitengestützte, präzise Informationen zur Lage und Höhe des Messschiffes abrufbar sein, um ein Koordinatentripel (x, y, z) jeden Punktes an der Flusssohle zu erhalten. Die Koordinaten wurden im Gauß-Krüger Koordinatensystem (Datum Rauenberg, Bessel-Ellipsoid - 3° Meridianstreifen) aufgenommen und liegen im Höhenstatus DHHN 1992 vor (Ortungsverfahren PDGPS).

Die Flusssohle im Untersuchungsgebiet Lühe wurde in zwei Streifen abgefahren, der Überlappungsbereich liegt bei ungefähr drei Metern. Die Auflösung beträgt 0,6 m x 0,45 m (Abstand zwischen zwei Messpunkten). Dies entspricht einer Punktdichte von 3,7 Messpunkten/m². Die Flusssohle im Untersuchungsgebiet St. Margarethen wurde in mehreren Streifen parallel zum Ufer abgefahren, der Überlappungsbereich liegt bei mehreren Metern. Die Auflösung liegt bei etwa 0,75 m x 0,45 m. Dies entspricht einer ungefähren Punktdichte von 2,96 Messpunkten/m².

Tabelle 1: Ausgewählte Datensätze der Transportkörperstrecke Lühe zwischen Elbe-km 644,9 und 646,05 sowie Peilrichtung und Tidephase.

Datum	Uhrzeit	Streifen	Peilrichtung	Tidephase
02.06.2009	09:20	2	stromab	Flut
02.06.2009	15:20	2	stromauf	Ebbe
03.06.2009	07:45	2	stromab	Ebbe
03.06.2009	15:35	2	stromauf	Ebbe
04.06.2009	07:35	2	stromab	Ebbe
05.06.2009	07:35	2	stromab	Ebbe
05.06.2009	12:30	2	stromauf	Flut

Tabelle 2: Ausgewertete Peildatensätze der Transportkörperstrecke St. Margarethen zwischen Elbe-km 685,5 und 689,8 sowie die dazugehörigen Oberwasserabflüsse bei Neu Darchau und Tidephasen zum Zeitpunkt der jeweiligen Peilung.

Datum	Uhrzeit	Streifen	Abfluss (7 Uhr)	Tidephase
01.03.2010	10:15 - 10:55	4	1004	Flut
09.03.2010	08:49 - 09:32	5	1874	Ebbe
31.03.2010	7:56-9:16	8	1614	Ebbe
21.04.2010	nicht ausgewertet		970	
28.04.2010	7:38 - 8:48	7	741	Ebbe
10.05.2010	7:56-8:55	5	646	Flut
31.05.2010	nicht ausgewertet			
15.06.2010	nicht ausgewertet			
30.06.2010	08:55 - 09:57	5	572	Ebbe
12.07.2010	9:19 - 10:28	6	371	Ebbe/Flut
04.08.2010	7:29 - 8:11	5	519	Flut
16.08.2010	nicht ausgewertet			

4.2 Sedimenttransport

4.2.1 Allgemein

Sedimente sind Feststoffe, die vom Wasser transportiert werden. In Anlehnung an Vollmer & Schriever (2005) können Sedimente in die Anteile Geschiebe, suspendierter Sand und Feinschwebstoffe unterteilt werden (Abbildung 4). Als Geschiebe werden alle Feststoffe bezeichnet, die an der Gewässersohle gleitend, rollend oder springend transportiert werden. Der Geschiebetransport erfolgt dabei teilweise über Transportkörper unterschiedlichen Ausmaßes, die von einem dünnen Sedimentschleier bis hin zu Dünen von mehreren Metern Höhe variieren können. Suspendierter Sand wird bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten kurzzeitig resuspendiert und mit der Strömung transportiert, sonst steht er in Wechselwirkung mit der Sohle und wird zeitweise auch dem Geschiebe zugerechnet. Feinschwebstoffe werden durch Turbulenz längerfristig in der Wassersäule gehalten.

Korngröße [mm]	Feststoff- komponente	Frachtart		
		allgemein	speziell	gesamt
Ton u. Schluff < 0,063	Feinschweb- stoff	Suspensionsfracht, Schwebstofffracht (<i>suspended load</i>)	Spülfracht (<i>wash load</i>)	Gesamtfest- stoff- fracht (<i>total sediment load</i>)
Sand 0,063 – 2	Suspendierter Sand		Bettbildende Fracht	
Kies 2 – 63	Geschiebe (<i>bed load</i>)	Bodenfracht, Geschiebefracht (<i>bed load</i>)		
Steine > 63				

Abbildung 4: Allgemeine Klassifikation der Komponenten des Feststofftransports (Vollmer & Schriever, 2005).

In der Tideelbe werden die Sedimente der Schluff- und Tonkorngröße (in Abhängigkeit der Flockengröße) zu den Feinschwebstoffen gezählt. Dieser Anteil der Gesamtfeststofffracht wird von Trübungssonden an mehreren Dauermessstationen entlang der Tideelbe kontinuierlich erfasst. Die gröberen Sedimente der Korngröße Sand und Kies (Feinkies) werden vorrangig als Geschiebe oder sohl nah als suspendierter Sand transportiert. Zwischen den einzelnen Frachtarten und den dabei transportierten Sedimenten besteht allerdings keine scharfe Grenze. Der Transport findet in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit statt (Zanke, 2002).

Aufgrund der schwierigen Randbedingungen (hohe Strömungsgeschwindigkeiten, große Wassertiefen) und der nautisch bedingten Beschränkungen (Schifffahrt) liegen keine direkten Messungen des Geschiebes aus dem Bereich der Fahrinne vor. Umso wichtiger ist es daher, die Morphologie der Gewässersohle, insbesondere der Transportkörper, mittels indirekter Messmethoden wie z.B. der Echolottechnik zu beschreiben, zu erfassen und darauf basierend den Geschiebetransport abzuschätzen.

4.2.2 Transportkörper

In Flüssen wird sohlgebundenes Sediment in Form von asymmetrischen Transportkörpern verfrachtet. In der Literatur wird grundsätzlich zwischen Riffeln, Dünen und Antidünen unterschieden. Riffel und Dünen treten nur im unteren Fließregime ($Fr < 1$) auf und lassen sich nicht eindeutig voneinander abgrenzen. Riffel sind dabei meist sehr klein und haben einen anderen physikalischen Ursprung als Dünen. Riffel bilden sich durch Prozesse in der Grenzschichtlage (Kraft, 2009). Transportkörper zwischen 0,6 und 1000 m Länge werden allgemein in ihrer Gesamtheit als Dünen bezeichnet (Ashley, 1990). Sie können weiter unterteilt werden in kleine (0,6-5 m), mittlere (5-10 m), große (10-100 m) und sehr große Dünen (> 100 m). Darüber hinaus können sie mit Hilfe ihrer Kammform (2D- und 3D-Dünen) und der Korngröße näher klassifiziert werden. Antidünen treten nur im oberen Fließregime bei Froude-Zahlen > 1 auf. Riffel und Antidünen werden im Folgenden nicht näher betrachtet.

Subaquatische Dünen haben meist eine geringere Hangneigung auf der strömungszugewandten Seite (Luv-Seite) und eine steilere Hangneigung an der strömungsabgewandten Seite (Lee-Seite). Der Bewegung von Dünen in Strömungsrichtung geht eine Erosion am flachen Luvhang voraus. Dabei werden Sedimentkörner rollend oder springend die Luvseite hinauftransportiert und akkumulieren am Kamm (van Rijn, 1993). Sobald die Lage am Kamm instabil wird, rutschen die Körner den Leehang hinab und sedimentieren dort.

In der Literatur gibt es verschiedene empirische Beziehungen für das Verhältnis von Dünenhöhe (H) zu Dünenlänge (L). Aufgrund der empirischen Grundlage sämtlicher Beziehungen setzt deren Anwendung die Beachtung bestimmter Gültigkeitskriterien voraus. Im Anschluss folgen die Beziehungen von Flemming (1988) für die mittlere und die maximale Transportkörperhöhe in Abhängigkeit der Transportkörperlänge:

$$H_{\max} = 0,16L^{0,84} \quad (\text{Flemming, 1988;2000})$$

$$H_{\text{mean}} = 0,0677L^{0,8098} \quad (\text{Flemming, 1988;2000})$$

Die Formel von Flemming (1988) basiert auf 1491 Labor- und Naturmessdaten, wobei die Naturmessdaten in Flüssen (Binnen- und Ästuarbereich), Schelfgebieten und Küsten erfasst worden sind. Aufgrund der hohen Anzahl an Naturmessdaten, auch aus tidebeeinflussten Gewässern, wurde diese Formel für die Untersuchung von Transportkörperstrecken an der Tideelbe als geeignet angesehen.

Ein limitierender Faktor der Dünenhöhe stellt die Verfügbarkeit von Sediment in der erforderlichen Fraktion dar. Je größer die Dünen werden, desto wahrscheinlich wird es, dass nicht genügend Sediment zur Verfügung steht (Flemming, 2000). Dünen können ihre maximale Größe bei entsprechenden hydrodynamischen Bedingungen nur erreichen, wenn genügend Sediment zum Aufbau des Dünenkörpers an der Flusssohle bereitgestellt wird (Carling *et al.*, 1993). In Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Sediment (Longitudinaldünen, Barchane, Transversaldünen) und der Mobilität der Sedimente (2D-/ 3D-Dünen) an der Sohle bilden sich verschiedene Dünenformen aus.

4.3 Software Dune Tracking 2D

Die Software DT2D (Wesseling & Wilbers, 2000) kann gleichermaßen für die Auswertung von Linien- und Fächerecholotpeilungen aus dem Binnen- und Küstenbereich verwendet werden. Mit Hilfe dieser Software können in den Peilungen komplexe Transportkörperstrukturen und -geometrien erkannt sowie deren Wandergeschwindigkeit bestimmt werden. Zur Anwendung kommt in diesem Bericht die Software DT2D in der Version 3.0.

Es wird angenommen, dass ein Transportkörper eindeutig bestimmt werden kann, wenn er durch 10 Punkte abgebildet wird (Abbildung 5). Daher bestimmt die Auflösung der Peildaten

in Längsrichtung (Abstand zwischen zwei Messpunkten circa 0,6 - 0,7 m) die kleinsten noch bestimmbar Transportkörperlängen. Entsprechend können mit dem Datensatz im Untersuchungsgebiet Lühe Transportkörper bis zu einer Länge von 6 m detektiert werden. Im Untersuchungsgebiet St. Margarethen ist es möglich, Transportkörper bis zu einer Länge von 7 bis 8 m aufzulösen. Alle kürzeren Strukturen sind daher nicht exakt als Transportkörper zu erkennen und werden aus den Datensätzen entfernt.

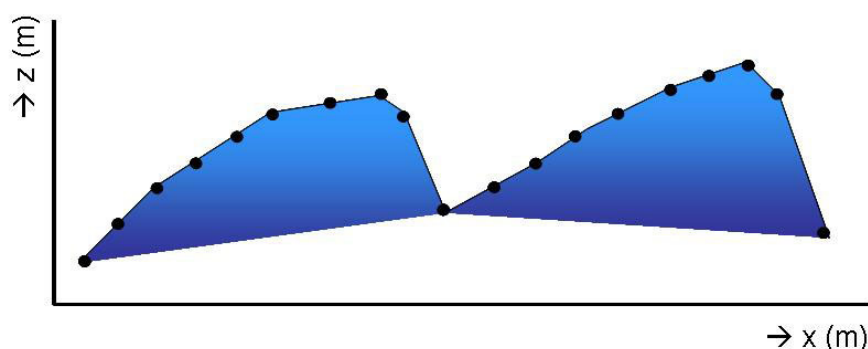


Abbildung 5: Transportkörper, die durch 10 Messpunkte aufgelöst werden (Frings, 2010).

Im Untersuchungsgebiet Lühe wird der gesamte gepeilte Bereich ausgewertet. Aufgrund der großen Datenmenge, welche für das Untersuchungsgebiet St. Margarethen vorliegt, wird hier die Software DT2D nur auf einen Teilausschnitt angewendet (Abbildung 6).

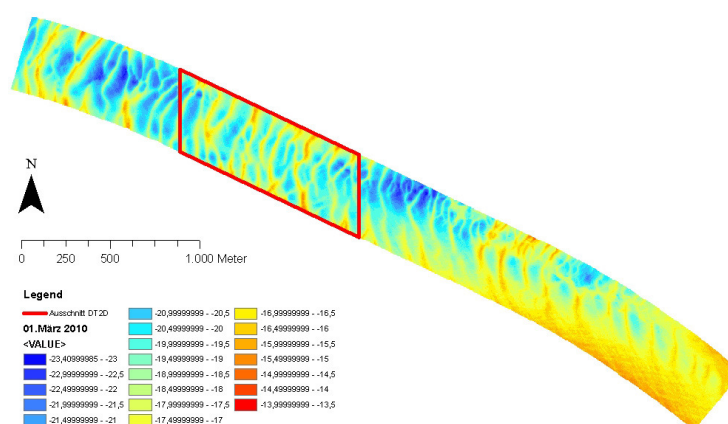


Abbildung 6: Nur der rot umrandete Bereich im Untersuchungsgebiet St. Margarethen wurde mit der Software DT2D ausgewertet.

In DT2D werden die auszuwertenden Flussabschnitte in einzelne Längsprofile (Loding) unterteilt. Diese liegen im Abstand von 20 m zueinander (entspricht dem Parameter loding distance, Abbildung 7). Entlang eines Lodings wird im Abstand von 5 m nach beiden Seiten (max. point deviation) nach Punkten gesucht, die dann auf das Loding projiziert werden. Daraus werden zweidimensionale Längsprofile aus den Lagekoordinaten und Höheninformationen der Fächerecholotdaten generiert. Durch jedes Längsprofil wird ein gleitender Durchschnitt berechnet und die Profilbereiche unter der Durchschnittsline werden von der Software als Transportkörpertrag definiert. Die Auswahl des gleitenden Durchschnitts kann dabei nicht vom Anwender bestimmt werden. Beim Vergleich zweier

zeitlich aufeinanderfolgender Längsprofile können mit Hilfe der Kreuzkorrelation die Migrationsbeträge der Transportkörper bestimmt werden. Die Randbereiche des gepellten Bereichs der Fahrrinne (circa 20 m) werden nicht in die Auswertungen miteinbezogen, da die Datendichte dort geringer ist und Transportkörper nicht zuverlässig detektiert werden können. In der Software DT2D wurden alle Peilungen mit den selben Voreinstellungen ausgewertet (Abbildung 7). Dies ermöglicht den Vergleich der Ergebnisse untereinander. Zur Beschreibung der Transportkörper werden die folgenden Parameter verwendet:

- Höhe der Dünen (H)
- Länge der Dünen (L)
- Höhen-Längen Beziehungen bzw. Steilheit (H/L)
- Migrationsgeschwindigkeit (c)

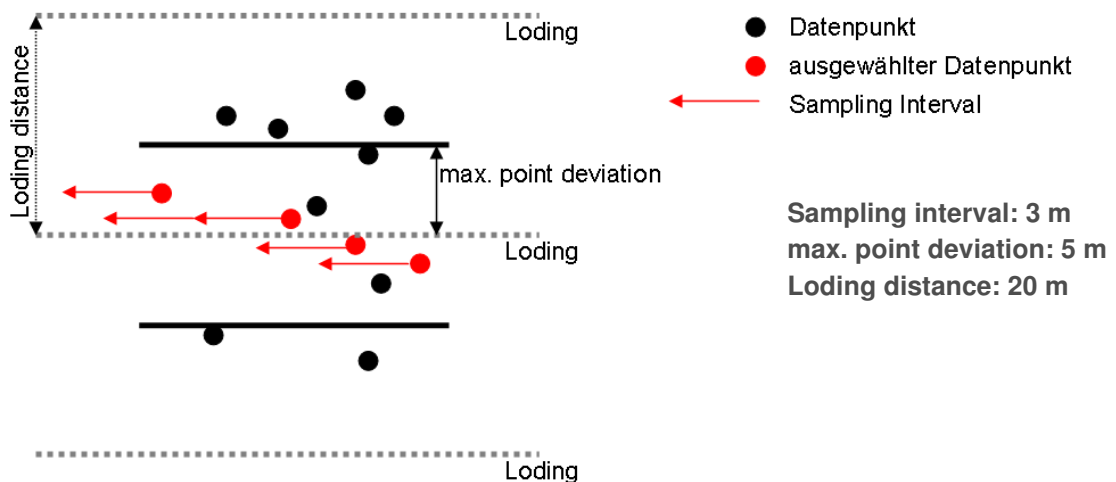


Abbildung 7: Implementierter Auswertalgorithmus in der Software DT2D und gewählte Voreinstellungen (Wesseling & Wilbers, 2000)

Darüber hinaus kann mit Hilfe der Transportkörpergeometrie und der Wandergeschwindigkeit der Transportkörper die Geschiebefracht abgeschätzt werden, indem entlang eines jeden Längsprofils ein Geschiebetransport q_b (inkl. der Porosität) berechnet wird. Die Berechnung erfolgt anhand der empirischen Gleichung nach (Ten Brinke *et al.*, 1999):

$$q_b = c \cdot H \cdot \beta \text{ [m}^2\text{/d]}$$

Dies entspricht der in einem definierten Zeitraum bewegten Fläche eines Transportkörpers im Vertikalschnitt wie in Abbildung 5 dargestellt. Darin entspricht c der Migrationsrate der Dünen (m/d), H der Dünenhöhe (m) und β einem dimensionslosen Koeffizient, der sich aus

$$\beta = 0,5 \cdot F \text{ [-]}$$

berechnet. Hierin ist F der sogenannte Formfaktor, der den tatsächlichen Flächeninhalt (A) der Düne in das Verhältnis zu der Fläche eines idealisierten Dreiecks aus Höhe (H) und Länge (L) der selben Düne setzt.

$$F = \frac{A}{0,5HL}$$

Der Gesamttransport [m^3/d] entspricht dann der Summe aller Einzeltransporte $q_{b,i}$ für jedes Längsprofil i unter Berücksichtigung der gewählten Streifenbreite (loding distance) [m].

4.4 Genauigkeit der Auswertungen

Echolotungen führen zu einem stochastischen Fehler (Rauschen) von einigen Zentimetern, wodurch die Dünendimensionen in DT2D überschätzt werden (Frings & Kleinhaus, 2007). Daher kommt es bei der Berechnung des Geschiebetransportes ebenfalls zu einer Überschätzung desselben. Die Auflösung der Peilungen in Längsrichtung gibt aufgrund der 10 Punkte-Definition (vgl. Kapitel 4.3) eine minimale, zu detektierende Dünenlänge vor. Bei den Peilungen im Untersuchungsgebiet Lühe und St. Margarethen wird diese minimale Dünenlänge auf 7 bis 8 m geschätzt (vergleiche Kapitel 4.3 Software Dune Tracking 2D). Alle Strukturen, die kleiner sind und aufgrund der Auflösung der Peildaten durch weniger als 10 Punkte abgebildet werden und somit nicht eindeutig als Transportkörper identifiziert werden können, werden aus den Datensätzen selektiert. Die fehlende Bestimmung dieser kleineren Transportformen führt zu einer Unterschätzung des Geschiebetransportes. Während der Peilung wird die Flusssohle durch Beams des Echolots in mehreren Peilstreifen abgetastet, welche zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengesetzt werden. Dadurch können Ungenauigkeiten entstehen, da die einzelnen Peilstreifen häufig in entgegengesetzter Richtung aufgenommen wurden, die Überlappungsbereiche quer zur Fließrichtung unterschiedlich groß sind oder sich die Wasserstände aufgrund der Gezeiten zwischenzeitlich verändert haben. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor bildet die natürliche Variationen in der Dünenbewegung und im Geschiebetransport, die von Transportkörper zu Transportkörper unterschiedlich sein können.

5. Ergebnisse

5.1 Untersuchungsgebiet Lühe

5.1.1 Transportkörpergeometrie

Die Längen der ausgewerteten Transportkörper im Untersuchungsgebiet Lühe liegen im Durchschnitt zwischen 25 und 50 m und gehören daher zu den von Ashley (1990) definierten „großen Dünen“ (10 und 100 m). Die Dünenhöhen erreichen Werte zwischen 0,6 und 1,7 m. Die Dünenhöhen und -längen nehmen über die gepeilte Flussbreite vom nördlichen zum südlichen Fahrrinnenrand deutlich ab (Abbildung 8). Die Steilheit (H/L) liegt im Mittel bei 0,035.

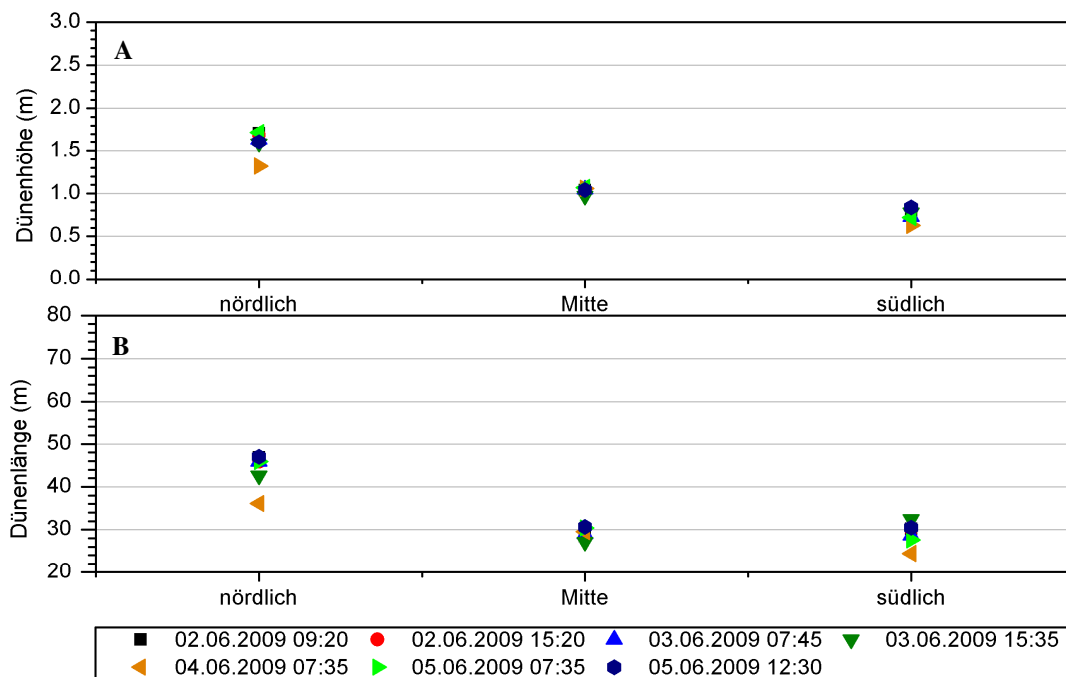


Abbildung 8: Mittelwerte der Dimensionen aller ausgewerteten Dünen in den drei Bereichen nördlich, südlich und in der Mitte der Fahrrinne (Dünenhöhe A, Dünenlänge B).

5.1.2 Oberwasserabhängigkeit der Transportkörpergeometrie

Im Untersuchungsgebiet Lühe wurden Datensätze von Einzelpeilungen an vier aufeinanderfolgenden Tagen ausgewertet. Die Oberwasserabflüsse am Pegel Neu Darchau (Tagesmittel) nehmen jedoch um nur $10 \text{ m}^3/\text{s}$ während des Peilzeitraums zu. Diese Zunahme

ist damit zu gering für eine Analyse der Oberwasserabhängigkeit der Dünenhöhen und -längen im Untersuchungsgebiet Lühe (Abbildung 9).

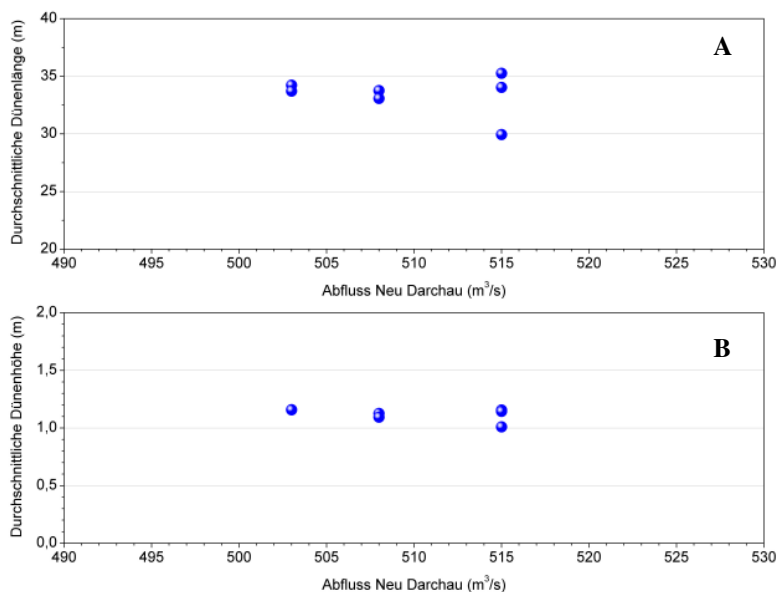


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Dünenlänge (A) bzw. Dünenhöhe (B) und dem Oberwasserabfluss.

5.1.3 Höhen-Längen Beziehung

Abbildung 10 setzt die Höhen und Längen sämtlicher im Untersuchungsgebiet Lühe mit Hilfe der Softwarein DT2D detektierten Transportkörper miteinander in Beziehung. Zugleich wird die Abbildung um die empirischen Gleichungen nach Flemming (1988) für maximale (H_{\max}) und mittlere (H_{mean}) Dünenhöhen ergänzt. (vgl. Kapitel 4.2.2 Transportkörper). Es ist zu erkennen, dass die im Untersuchungsgebiet Lühe von DT2D detektierten Transportkörpergeometrien sowohl im Maximal- als auch im Mittelwert mit den Ergebnissen nach Flemming (1988) übereinstimmen. Für die Beziehung der maximalen Dünenhöhen trifft die zuvor gemachte Aussage nur auf kürzere Dünen mit einer Länge von bis zu 20 bis 25 m zu. Bei längeren Dünenkörpern können im Untersuchungsgebiet Lühe im Vergleich zu den Ergebnissen nach Flemming (1988) nur noch Dünen geringerer Höhen festgestellt werden.

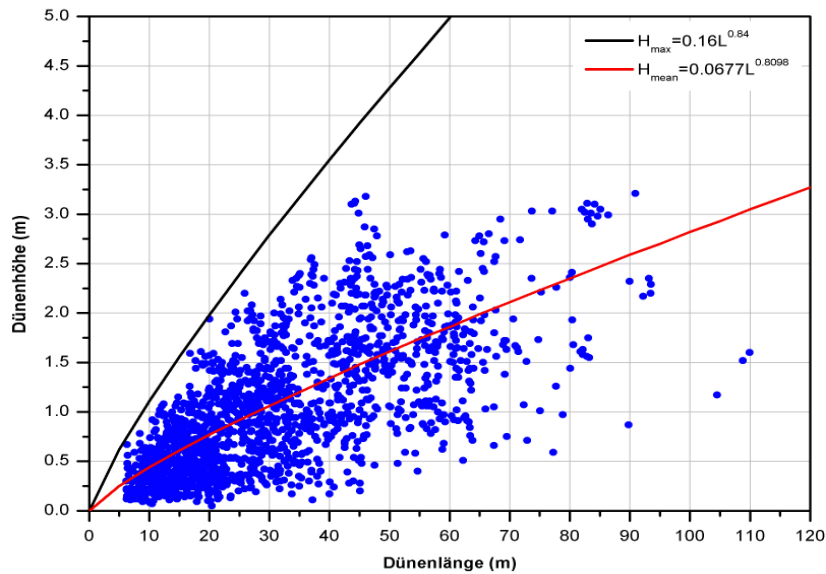


Abbildung 10: Höhen-Längen Beziehungen der Dünen bei Lühe. In schwarz und rot die von Flemming (1988) definierte Funktion für H_{\max} und H_{mean} .

5.1.4 Superposition

In der Software DT2D wurden die Einstellungen so gewählt, dass die großen Transportformen erkannt werden, das heißt, das „Sampling Interval“ wurde mit 3 m relativ groß voreingestellt (vgl. Kapitel 4.2.2 Transportkörper). Dünen kleinerer Längen, die sich vermutlich über die größeren Dünenkörper in Superposition hinweg bewegen, werden nicht erfasst. Unabhängig von der jeweiligen Softwareeinstellung können kleine Transportkörperstrukturen auch aufgrund der Auflösung der Peildaten und der 10 Punkte-Definition für eine Düne nicht abgebildet werden (vergleiche Kapitel 4.3 Software Dune Tracking 2D). Zuletzt ändern kleine Dünen häufig ihre Bewegungsrichtung mit Ebbe und Flut, vereinigen sich, teilen sich, verschwinden oder bilden sich neu (Gaeuman & Jacobson, 2007) und können daher in der zeitlich darauf folgenden Peilung nicht mehr wiedererkannt bzw. zugeordnet werden. Die Dünen in Superposition bewegen sich meist etwas schneller und tragen ebenfalls zum sohlgebundenen Transport bei. Zukünftig muss versucht werden, auch diese Dünen zu detektieren, da die zur Zeit mögliche Schätzung des sohlgebundenen Sedimenttransportes den tatsächlichen unterschätzt (vgl. Kapitel 4.4 Genauigkeit der Auswertungen).

Um der Frage der kleinstmöglichen, noch detektierbaren Dünenstruktur nachzugehen, wurden für einen Peildatensatz im Untersuchungsgebiet Lühe in DT2D die Einstellungen variiert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Die Geometrie der Dünen, die sich teilweise in Superposition der größeren befinden, konnte für jede Peilung bestimmt werden, eine Migration dieser Dünen dagegen, wie bereits im Absatz zuvor erläutert, nicht. In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist der Vergleich zwischen den beiden Ergebnissen dargestellt. Beim Versuch, kleinere Dünen zu detektieren, ergab sich; dass 75 % der Dünen kürzer als 20 m sind, bei der Bestimmung der größeren Dünen sind 75 % der Dünen kürzer als 38 m.

Ungefähr 30 % der detektierten Formen sind kleiner 6 m und daher nicht eindeutig als Dünen identifizierbar (Abbildung 12).

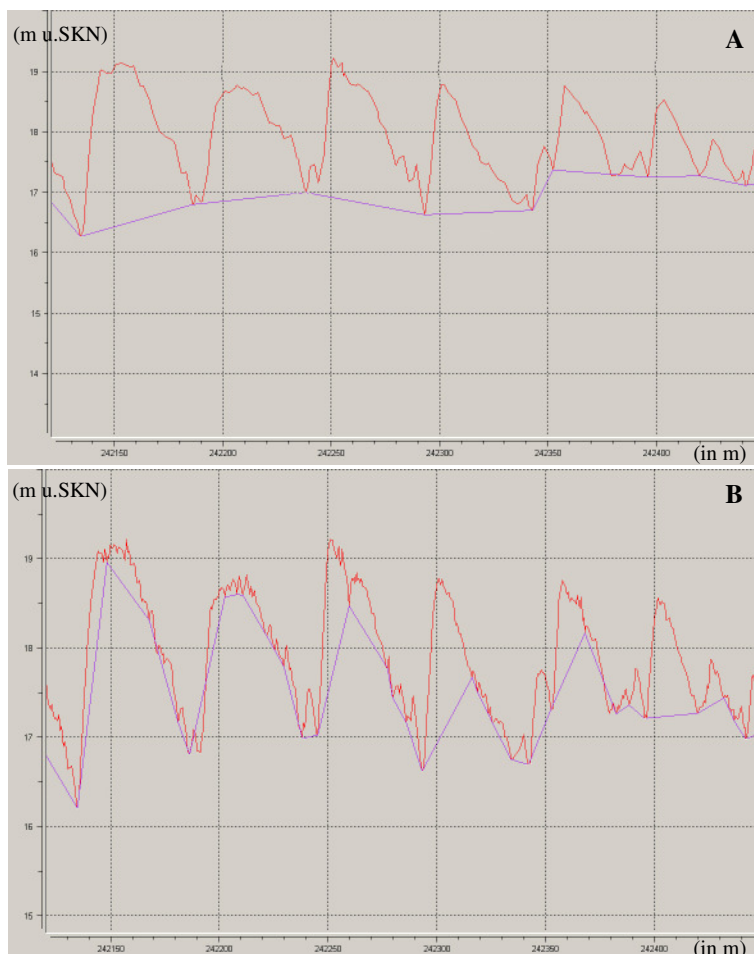


Abbildung 11: Screenshot eines Längsschnittes durch den gepeilten Bereich am 02. Juni 2009 09:20 Uhr mit feineren Einstellungen (1/1/5) (B) und gröberer Einstellungen (3/5/20) (A) für sampling interval, max. point deviation und loding distance.

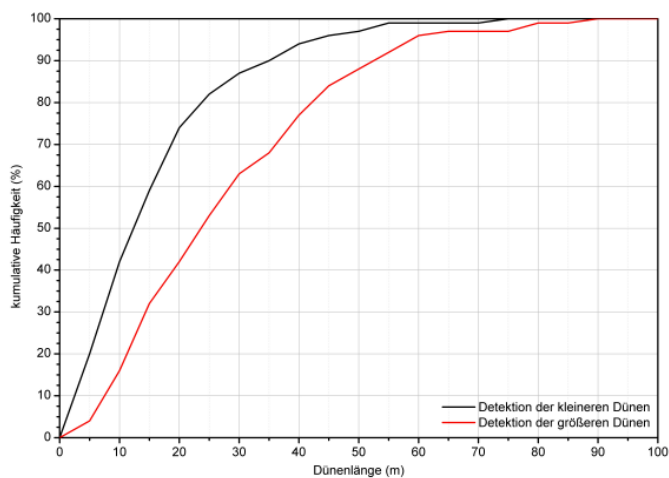


Abbildung 12: Versuch, die Dünen in Superposition zu erfassen. Vergleich der Auswertungen mit den Einstellungen 3/5/20 (rot) und den Einstellungen 1/1/5 (schwarz).

5.1.5 Dünenform und Transportrichtung

Im Untersuchungsgebiet Lühe sind die Transportkörper im Durchschnitt 32 m lang und 1 m hoch. Die Geometrie dieser großen Dünen gibt Aufschluss über ihre Netto-Transportrichtung (Nasner, 1974). Terwindt (1970) hat beobachtet, dass Dünen mit Höhen über 30 cm sich noch in Folge der Strömungsumkehr während einer Tidephase in ihrer Geometrie umorientieren können, dies aber unwahrscheinlich ist. Die Geometrie (Ebbestrom- oder Flutstromorientierung) von Dünen mit Höhen über 100 cm ist meist das Ergebnis eines langfristig mittleren Strömungsregimes. Es ist daher davon auszugehen, dass die im Untersuchungsgebiet Lühe vorgefundene Orientierung der Dünen nicht durch den zum Zeitpunkt der Fächerecholotpeilung herrschenden Flut- bzw. Ebbestrom sondern langfristig durch ein mittleres Strömungsregime geprägt worden ist. Wie, in Kapitel 4.2.2 Transportkörper, beschrieben, bewegen sich die Dünen in der Regel in Richtung ihres steileren, kürzeren Hangs. Im Untersuchungsgebiet Lühe sind die Dünen asymmetrisch, wobei die in Richtung Nordsee gelegenen Hänge länger als die in Richtung Hamburg gelegenen Hänge sind. Diese Asymmetrie deutet auf eine Flutstromorientierung der in Abbildung 13 und Abbildung 14 in rot dargestellten Dünen hin. Die lila Linie darunter stellt die Basislinie, also den nach unten verschobenen gleitenden Durchschnitt dar (vgl. Kapitel 4.3 Software Dune Tracking 2D“).

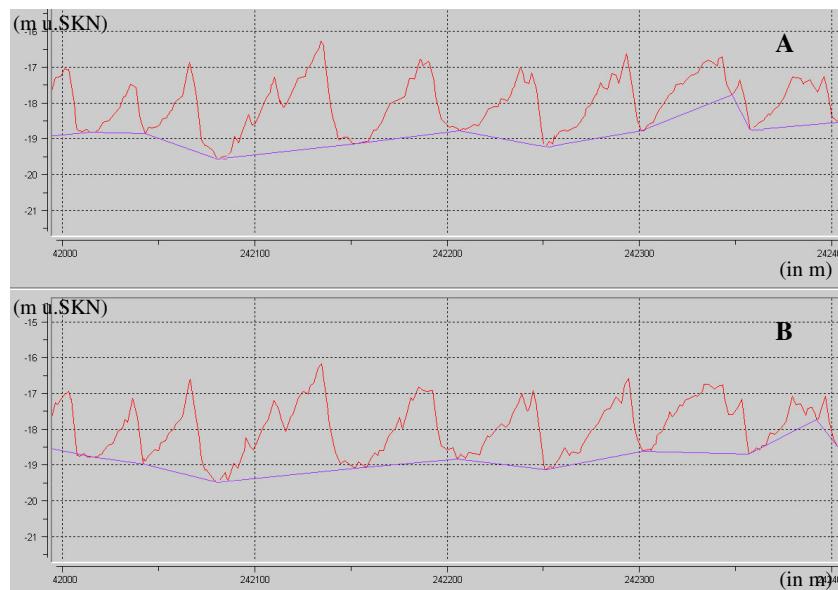


Abbildung 13: Screenshot des Längsschnittes durch den gepellten Bereich (40 m nördlich der Mitte). A: 02. Juni 2009 09:20 Uhr und B: 02. Juni 2009 15:20 Uhr.

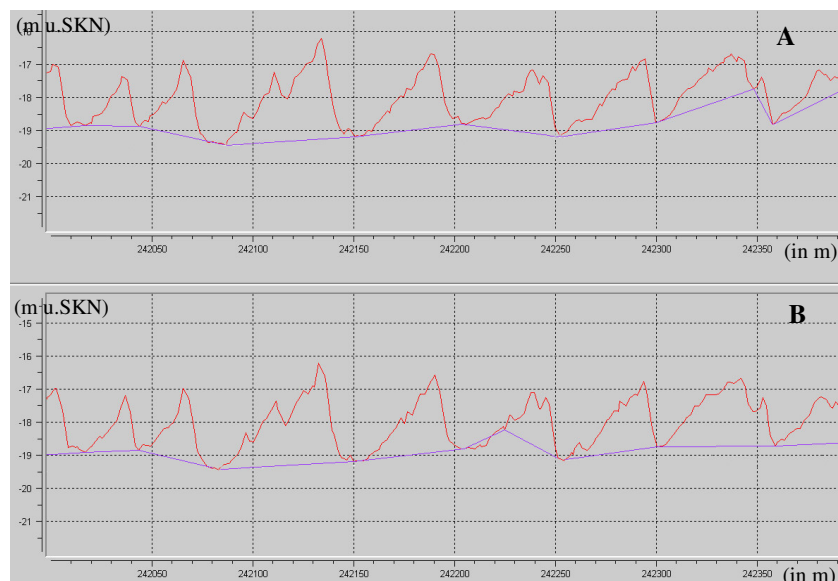


Abbildung 14: Screenshot eines Längsschnittes durch den gepellten Bereich (40 m nördlich der Mitte). A: 04. Juni 2009 07:35 Uhr und B: 05. Juni 2009 07:35 Uhr

Teilweise finden kleine Umbildungen am Dünenkamm statt. Bei Lühe wurde versucht, diese Veränderung im Kammbereich in Folge der Strömungsrichtungsänderung bedingt durch die Gezeiten kenntlich zu machen. Aus den in Abbildung 15 gezeigten Längsprofilen geht hervor, dass die größeren Dünen annähernd lagestabil bleiben, während im Kammbereich kleinere Umformungen stattfinden, die Kammbereiche wachsen an, werden kleiner oder verformen sich in eine Richtung. Die beobachteten Verformungen können jedoch nicht näher quantifiziert werden. Die kleineren Dünenstrukturen, teilweise in Superposition mit den großen Dünen, sind zur Bestimmung der Netto-Transportrichtung weniger geeignet, da sie dazu neigen, kurzfristig ihre Geometrie dem aktuellen Ebbe- bzw. Flutstromgeschehen anzupassen (Gaeuman & Jacobson, 2007).

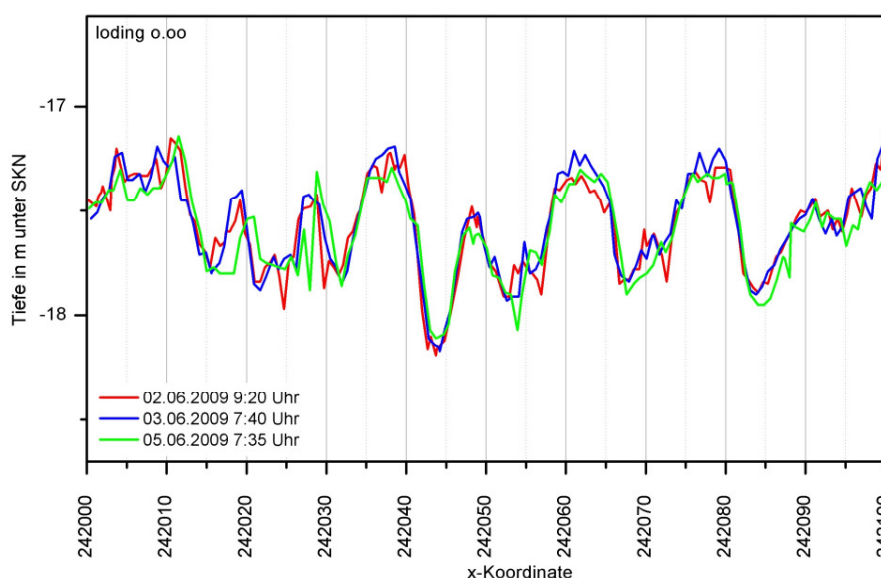


Abbildung 15: Längsprofile (Loding 0.00) zu drei verschiedenen Zeitpunkten durch den gepellten Bereich im Untersuchungsgebiet Lühe.

5.1.6 Migration und Geschiebetransport

Im Untersuchungsgebiet Lühe kann aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung bei den aufeinander folgenden Peilkampagnen keine Migration zwischen den Dünen bestimmt werden. Dies bedeutet aber nicht, dass es bei diesen Dünenstrukturen keine Wanderbewegung gibt. Eine Migration konnte nur zwischen der Peilung vom 02.06.2009 um 15:20 Uhr und der Peilung vom 05.06.2009 um 12:30 Uhr bestimmt werden. Die Migration der Transportkörper in Richtung Hamburg beträgt im Zeitraum von 2,88 Tagen ca. 1,5 m und damit 0,52 m/d.

5.2 Untersuchungsgebiet St. Margarethen

5.2.1 Transportkörpergeometrie

Die Transportkörpergrößen variieren über die Breite des durch Flächenpeilung abgedeckten Bereichs der Fahrrinne stark. Die Dünenlängen erreichen zwischen 40 und 80 m, während die Dünenhöhen zwischen 1,5 und 2,8 m schwanken (Abbildung 16). Es handelt sich aufgrund der Transportkörperabmessungen um die von Ashley (1990) definierten „großen Dünen“. Am nördlichen Fahrrinnenrand sind die Dünen meist etwas kürzer als am südlichen Rand. In der Mitte der Fahrrinne liegen die längsten Dünen vor. Die Dünenhöhen am nördlichen und südlichen Fahrrinnenrand entsprechen einander, während die Dünenhöhen in der Mitte der Fahrrinne am größten sind.

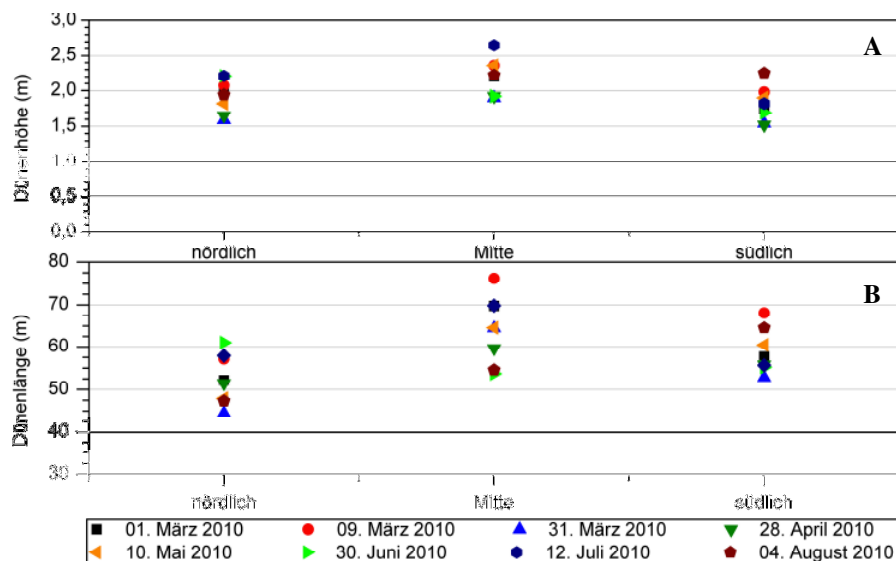


Abbildung 16: Mittelwerte der Dimensionen der Dünen in den Bereichen nördlich, südlich und in der Mitte der Fahrrinne (Dünenhöhe A, Dünenlänge B).

5.2.2 Oberwasserabhängigkeit der Transportkörpergeometrie

In Abbildung 17 ist der Oberwasserabfluss gemessen am Pegel Neu Darchau (Elbe-km 536,5) gegen die in DT2D detektierten Dünenhöhen und Dünenlängen im

Untersuchungsgebiet St. Margarethen aufgetragen. Die dieser Auswertung zugrunde liegenden Peildaten wurden im Zeitraum März bis Mitte August 2010 erhoben. Die verschiedenen Messungen haben dabei ein breites Spektrum an Oberwassersituationen zwischen 371 m³/s (mittlerem Niedrigwasser NMQ - 276 m³/s) und 1874 m³/s (mittleres Hochwasser MHQ - 1900 m³/s) erfasst. Eine Messung bei Niedrigwasser (NQ - 145 m³/s) und Hochwasser (HQ - 3620 m³/s) hat in diesem Zeitraum nicht stattgefunden (statistische Abflusskennzahlen aus DGJ, 2003). Die mit DT2D erzielten Ergebnisse zeigen für diesen Datensatz, dass ein zunehmender Oberwasserabfluss einen nicht signifikanten Einfluss auf die durchschnittlichen Dünenlängen und -höhen im Untersuchungsgebiet hat. Es kann ein leicht abnehmender Trend bei Dünenhöhen und -längen beobachtet werden, welcher jedoch durch den Messwert bei einem maximalen Oberwasserabfluss von circa 1900 m³/s nicht bestätigt wird.

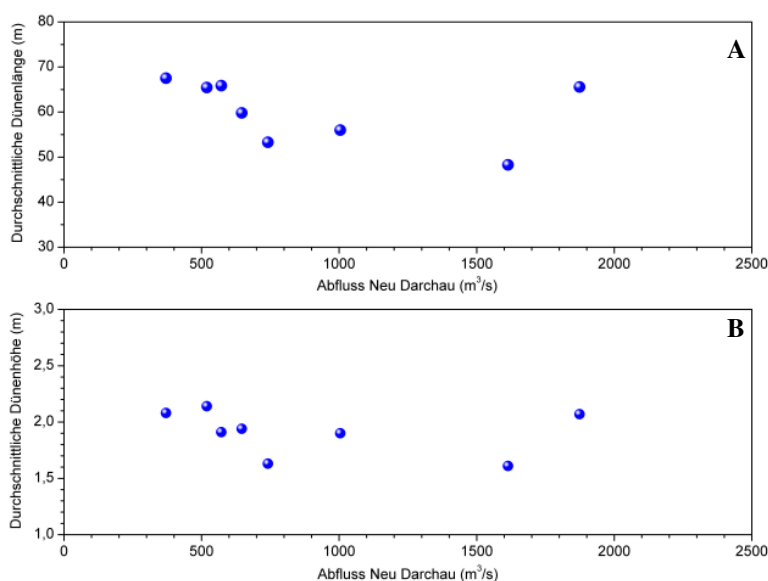


Abbildung 17: Beziehung zwischen Oberwasserabfluss bei Neu Darchau und der Dünenlänge (A) sowie der Dünenhöhe (B) im Untersuchungsgebiet St. Margarethen.

5.2.3 Höhen-Längen Beziehung

Ein ähnliches Bild wie im Untersuchungsgebiet Lühe ergibt sich auch für die Dünen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen. Insgesamt sind die Dünen länger und höher als bei Lühe. Sie weisen aber eine geringere Steilheit (H/L) von durchschnittlich 0,03 auf. Die durchschnittlichen und maximalen Dünenhöhen sind wieder durch die empirische Gleichung von Flemming (1988) (vgl. Kapitel 4.2.1 Allgemein) zusammen mit den Höhen und Längen der Dünen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen in Abbildung 18 dargestellt. Die Dünen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen überschreiten die maximale Dünenhöhe von Flemming geringfügig in zwei Fällen. Tendenziell liegen die maximal erreichten Dünenhöhe etwas unter der maximal möglichen Dünenhöhe gemäß der durch Flemming definierten Grenzkurve. Sind die Dünen länger als 40 bis 60 m, wird die maximal mögliche von Flemming definierte Dünenhöhe deutlich nicht mehr erreicht. Für die Beziehung eines

mittleren Verhältnisses zwischen Dünenhöhe und -länge kann eine leichte Unterschätzung der im Untersuchungsgebiet St. Margarethen vorgefundenen Verhältnisse erkannt werden.

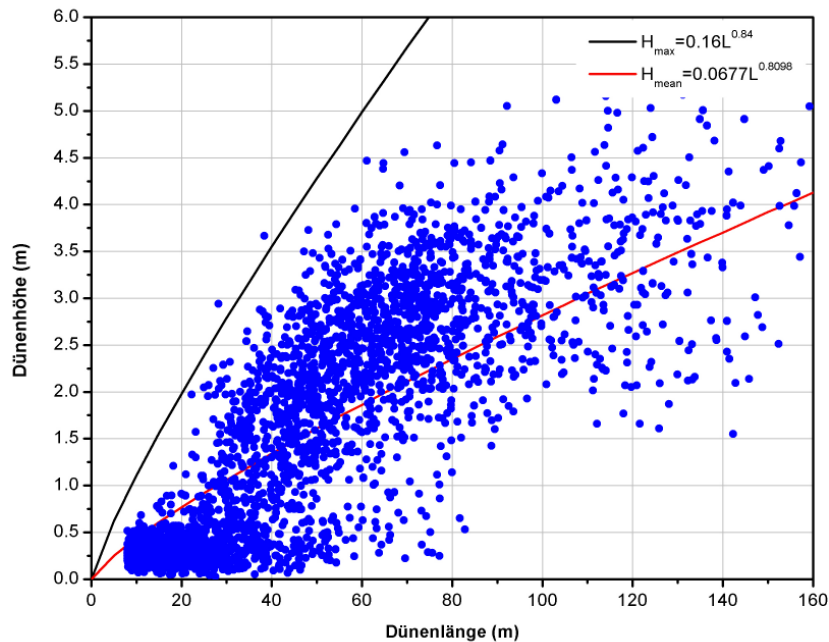


Abbildung 18: Längen-Höhen-Beziehungen der Dünen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen. In schwarz und rot die von Flemming (1988) definierte Funktion für H_{\max} und H_{mean} .

5.2.4 Superposition

Im Untersuchungsgebiet St. Margarethen wurden die selben Einstellungen in der Software DT2D gewählt wie bereits zuvor im Untersuchungsgebiet Lühe. Für eine zuverlässige Detektion der größeren Transportformen wurde ein „Sampling Interval“ von 3 m voreingestellt. Es ist anzunehmen, dass sich auch über diese detektierten Dünen kleinere Dünen in Superposition hinweg bewegen. Eine weitergehende Untersuchung der Dünen in Superposition wurde im Gebiet St. Margarethen jedoch nicht vorgenommen, da es aufgrund der geringeren zeitlichen Auflösung der ausgewerteten Peildaten nicht möglich ist, diese zu erfassen und einander zuzuordnen.

5.2.5 Dünenform und Transportrichtung

Die Geometrien der Dünen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen sind asymmetrisch. Bei höheren Oberwasserabflüssen ($Q_{09.03.2010} = 1874 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{28.04.2010} = 741 \text{ m}^3/\text{s}$) sind die kürzeren Hänge in Richtung Nordsee und die längeren Hänge in Richtung Hamburg geneigt (Abbildung 19). Die Transportkörper zeigen somit eine klare Ebbstromorientierung. In Abbildung 20 sind zwei Längsprofile während geringerer Oberwasserabflüsse ($Q_{30.06.2010} = 572 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{12.07.2010} = 371 \text{ m}^3/\text{s}$) dargestellt, in der die Asymmetrie der Dünen nicht mehr

eindeutig ebbstromorientiert ist. Dies könnte ein Hinweis auf eine Richtungsumkehr bei geringen Oberwasserabflüssen sein.

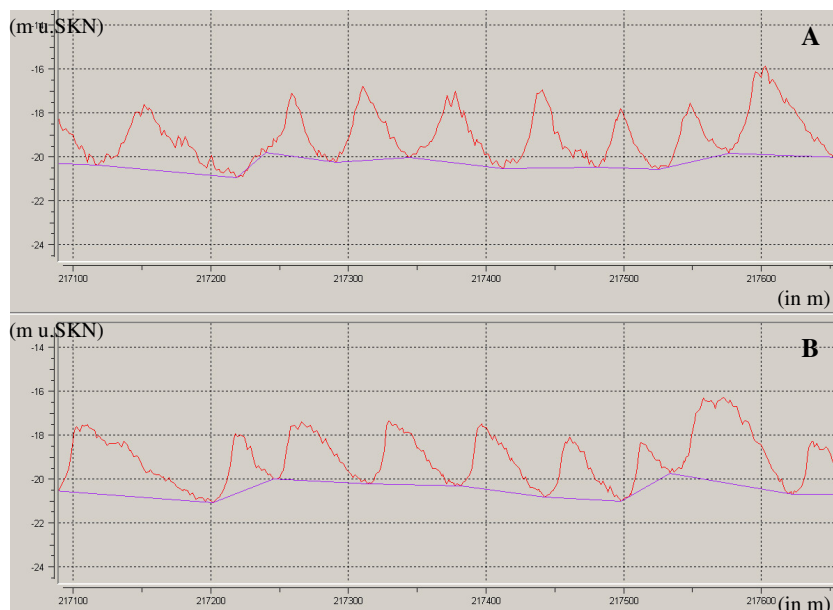


Abbildung 19: Screenshot eines Längsschnittes durch den gepeilten Bereich (60 m nördlich der Mitte des gepeilten Streifen). A: 01. März 2010 und B: 28. April 2010.

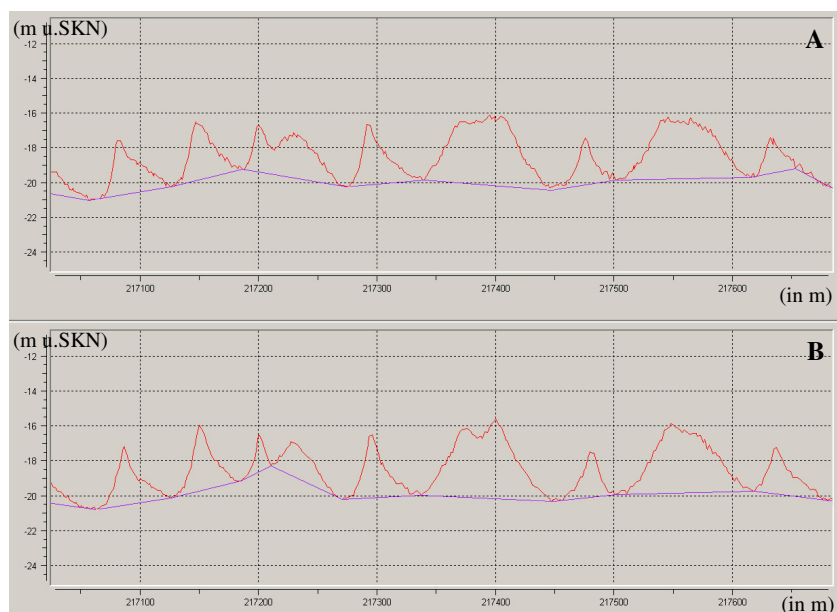


Abbildung 20: Screenshot eines Längsschnittes durch den gepeilten Bereich (180 m südlich der Mitte des gepeilten Streifen). A: 30. Juni 2010 und B: 12. Juli 2010

5.2.6 Migration und Geschiebetransport

Im Untersuchungsgebiet St. Margarethen konnten vor allem bei hohen Oberwasserabflüssen die Transportkörper zweier zeitlich aufeinanderfolgender Peilungen eindeutig zugeordnet werden. Für die Untersuchung einer Oberwasserabhängigkeit wurde der zwischen den

Zeitpunkten der Peilkampagnen am Pegel Neu Darchau gemessene Oberwasserabfluss gemittelt. Für durchschnittliche Oberwasserabflüsse unter $700 \text{ m}^3/\text{s}$ zeigen die Auswertungen geringe Migrationsgeschwindigkeiten der Dünen in Richtung Nordsee, die auch im Flussquerschnitt kaum variieren. Bei höheren Oberwasserabflüssen über $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ werden dagegen deutliche Wanderbewegungen der Dünen in Richtung Nordsee festgestellt.

Bei hohen Oberwasserabflüssen sind die Migrationsgeschwindigkeiten am südlichen Fahrinnenrand meist etwas geringer als am nördlichen. Die größten Migrationsbeträge wurden in der Fahrinnenmitte mit rund 1 m pro Tag bestimmt. Mit zunehmenden Oberwasserabflüssen nehmen die Migrationsgeschwindigkeiten in Richtung Nordsee zu. Bei abnehmenden Oberwasserabflüssen sind die Dünen relativ lagestabil, es können nur geringe bis gar keine Wanderbewegungen in Richtung Nordsee festgestellt werden. Zu beachten ist, dass es keine Auswertung der Wanderbewegungen von Dünen bei niedrigen Abflüssen $< 400 \text{ m}^3/\text{s}$ und bei Abflüssen im Bereich zwischen 650 und $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ gibt.

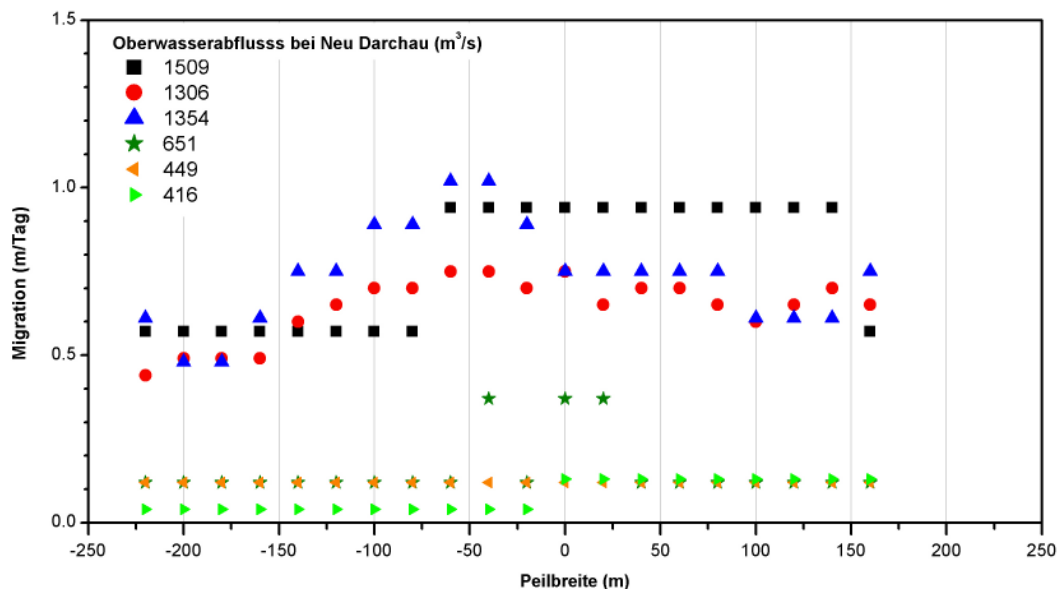


Abbildung 21: Migration der Dünen in Meter pro Tag Richtung Nordsee über den gepellten Streifen der ungefähr der Fahrrinne entspricht (0-Fahrinnenmitte) in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses bei Neu Darchau.

Für die Migrationsgeschwindigkeiten der Dünen im südlichen und nördlichen Fahrinnenbereich wurden getrennt Mittelwerte über den untersuchten Zeitraum gebildet. Im südlichen Fahrinnenbereich ist die Wanderbewegung der Dünen bei geringen Oberwasserabflüssen gleich der im nördlichen Fahrinnenbereich (Abbildung 22). Die Migration der erfassten Dünen zeigt grundsätzlich einen Trend zu höheren Geschwindigkeiten bei steigenden Oberwasserabflüssen. Daraus resultieren für den Geschiebetransport über den gesamten gepellten Bereich die in Abbildung 23 dargestellten transportierten Mengen in m^3 pro Tag.

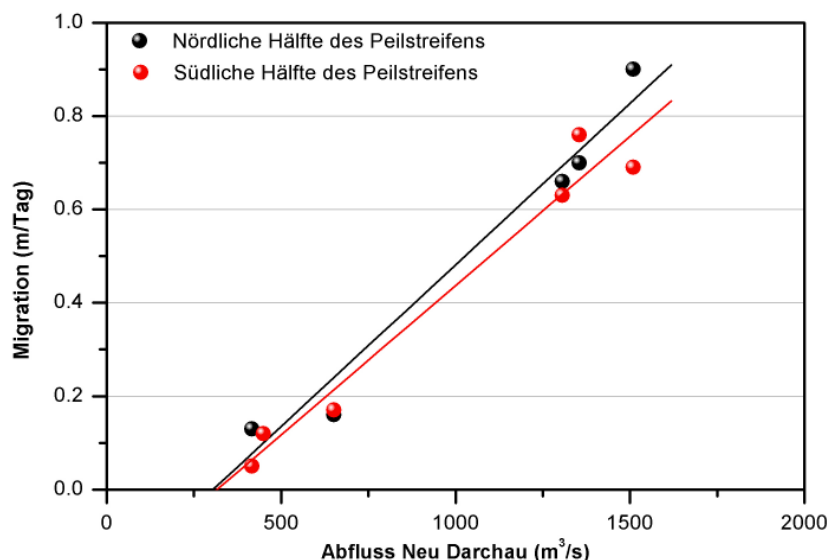


Abbildung 22: Durchschnittliche Migration in Richtung Nordsee in m pro Tag für die südliche und die nördliche Hälfte des gepellten Streifen.

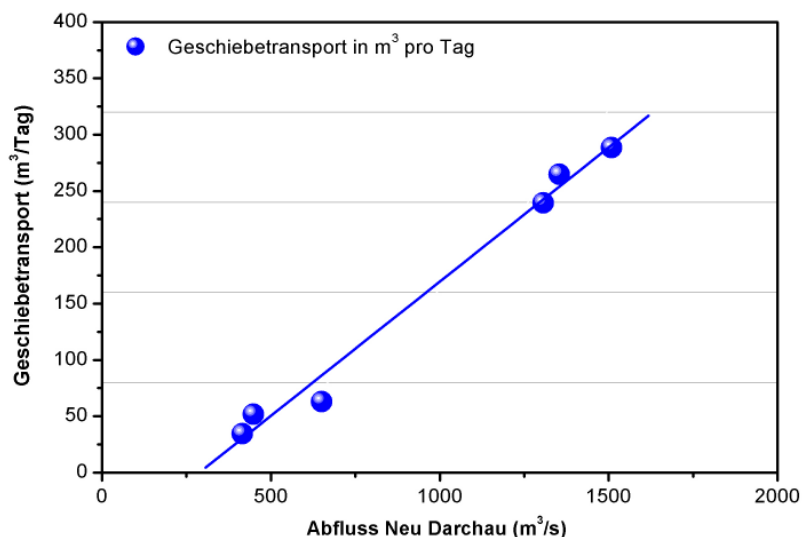


Abbildung 23: Geschiebetransport in m³ pro Tag in der Fahrrinne im Untersuchungsgebiet St. Margarethen in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses bei Neu Darchau.

Die in Abbildung 23 dargestellte Regressionsgerade hat die Form

$$q_b = 0.24Q - 68.75$$

Darin entspricht Q dem Oberwasserabfluss und q_b dem Geschiebetransport. Die Gerade stellt die Transport-Oberwasserabfluss-Beziehung dar, welche aus den ausgewerteten Migrationsbeträgen und den Düsendimensionen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen bestimmt wurde. Kombiniert man diese Funktion mit den Abflussganglinien von Neu Darchau ergeben sich die Tagesfrachten für den Fahrinnenbereich im Untersuchungsgebiet St. Margarethen. Aus der Summe der Tagesfrachten ergeben sich die Jahresfrachten.

Aufgrund einiger Unsicherheiten (vgl. Kapitel 4.4 Genauigkeit der Auswertungen) sind dies nur Größenordnungen und keinesfalls exakte Werte. Die Abschätzung der Tagesfrachten basiert nur auf den detektierten Dünen in der Fahrrinne. Dieser Wert unterschätzt den gesamten sohlgebundenen Sedimenttransport in der Fahrrinne systematisch, da der Transportanteil durch nicht erfasste, kleinere Dünen in Superposition unberücksichtigt bleibt. Für das Jahr 2009 wurde bei einem mittleren Oberwasserabfluss von $640 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Neu Darchau eine Sedimentfracht in Richtung Nordsee von rund $30\,000 \text{ m}^3$ berechnet. Für das feuchtere Jahr 2010 mit mittleren Oberwasserabflüssen von $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Neu Darchau nehmen die Jahresfrachten auf das Doppelte zu (Abbildung 24). Diese Frachten sind nur für den ein Kilometer langen untersuchten Fahrinnenbereich und die ausgewerteten Dünen bei St. Margarethen gültig und unterschätzen die tatsächliche Gesamtfracht.

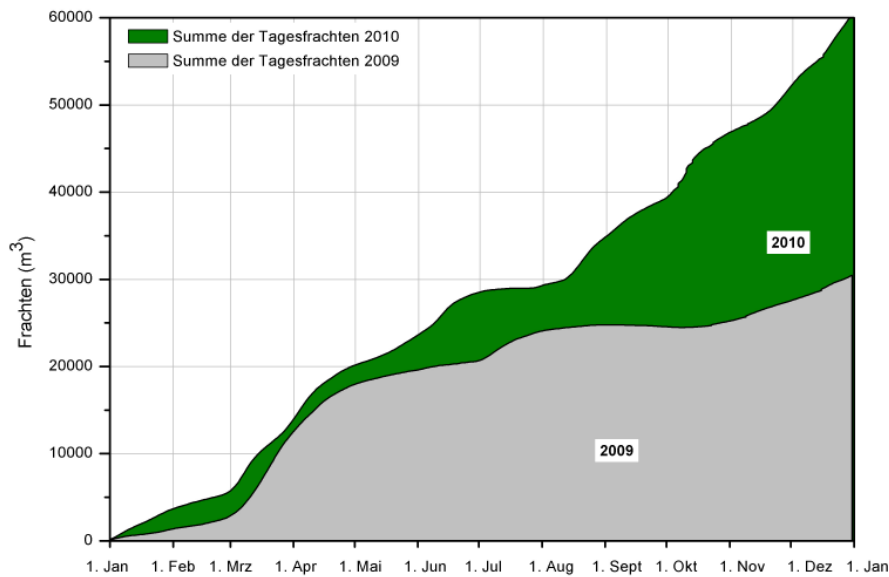


Abbildung 24: Summe der Tagesfrachten (Transport durch nicht erfasste, kleine Dünenstrukturen in Superposition ist in der Summe der Tagesfrachten nicht enthalten) in der Fahrrinne bei St. Margarethen berechnet mit Hilfe der Abflussganglinie bei Neu Darchau aus 2009 und 2010.

6. Diskussion und Schlussfolgerungen

6.1 Einfluss Oberwassersituation auf Wanderungsgeschwindigkeit und Transportrichtung der Dünen

Die Untersuchung der Dynamik von Dünen in der Tideelbe bei St. Margarethen zeigt eine gute Korrelation zwischen der Oberwassersituation am Pegel Neu Darchau und der Migrationsgeschwindigkeit von Dünen. Bei einer Abflusssituation von über 1200 m³/s konnten durch Auswertung von verschiedenen Fächerecholotpeilungen mit Hilfe der Software DT2D Migrationsgeschwindigkeiten der Dünen von durchschnittlich 0,7 m pro Tag in Richtung Nordsee festgestellt werden. Bei mittleren Oberwassersituationen zwischen 400 und 700 m³/s konnten immerhin noch geringe Wandergeschwindigkeiten von 0,12 m pro Tag in Richtung Nordsee bestimmt werden. Für das Untersuchungsgebiet Lühe lagen zur Analyse sieben Peildatensätze im Zeitraum vom 02.06.2009 bis 05.06.2009 vor. Für diesen kürzeren Untersuchungszeitraum war der Oberwasserabfluss mit circa 500 m³/s am Pegel Neu Darchau konstant und ließ daher eine ähnliche Analyse der Oberwasserabhängigkeiten nicht zu. Es ist jedoch anzunehmen, dass auch für dieses Untersuchungsgebiet der Oberwasserabfluss am Pegel Neu Darchau eine Randbedingung für die sich einstellenden Wandergeschwindigkeiten der vorliegenden Dünenstrukturen ist. Eine solche Oberwasserabhängigkeit der Wanderungsgeschwindigkeiten wurde übereinstimmend in ähnlichen Untersuchungen durch Nasner (1974) und Zorndt (2009) vorgefunden.

Abbildung 25 fasst sowohl die eigenen Ergebnisse als auch die Ergebnisse der ähnlichen Untersuchungen durch Nasner (1974) und Zorndt (2009) zur Wandergeschwindigkeit von Dünen zusammen. Eine Überprüfung der Ergebnisse von Nasner (1974) unter heutigen Bedingungen ist zu empfehlen. In der Qualität der Aussage haben die Ergebnisse weiterhin Bestand und wurden deshalb hier berücksichtigt. In der Abbildung sind die erfassten Wandergeschwindigkeiten und der Oberwasserzufluss gemessen am Pegel Neu Darchau gegeneinander aufgetragen. Sämtliche Auswertungen zeigen, dass ein zunehmender Oberwasserzufluss in die Tideelbe eine Verringerung der Wandergeschwindigkeiten in Richtung Hamburg bewirkt. Bei Überschreitung eines bestimmten Grenzabflusses kommt es zu einer Richtungskehr und einem Anstieg der Wandergeschwindigkeiten stromabwärts in Richtung Nordsee. Der Grenzabfluss variiert dabei je nach Lage des Untersuchungsgebietes entlang des Ästuars, für jede Transportkörperstrecke gibt es somit einen individuell gültigen Grenzabfluss. Im Zeitraum der eigenen Untersuchungen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen haben keine Echolotungen bei geringen Oberwasserabflüssen von < 400 m³/s am Pegel Neu Darchau stattgefunden. Es handelt sich daher um eine Extrapolation der eigenen Ergebnisse, die aber in der Tendenz mit den Ergebnissen durch Nasner (1974) und Zorndt (2009) bei geringen Oberwasserabflüssen übereinstimmen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass ein Klimawandel, der zunächst direkte Auswirkungen auf den Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau hat, langfristig die Dynamik der in der Tideelbe

untersuchten Transportkörper (Migrationsgeschwindigkeit und -richtung) beeinflussen wird und damit auch Einfluss auf den Sedimenthaushalt der Tideelbe haben kann. In diesem Wirkgefüge zwischen Klima und Sedimentdynamik wurde der Oberwasserabfluss am letzten binnenseitigen Pegel Neu Darchau als „klimasensitive“ Randbedingung identifiziert. Eine Beziehung zwischen diesem klimasensitiven Oberwasserabfluss und der Dünengeometrie konnte in den bisherigen Untersuchungsergebnissen jedoch noch nicht eindeutig hergestellt werden.

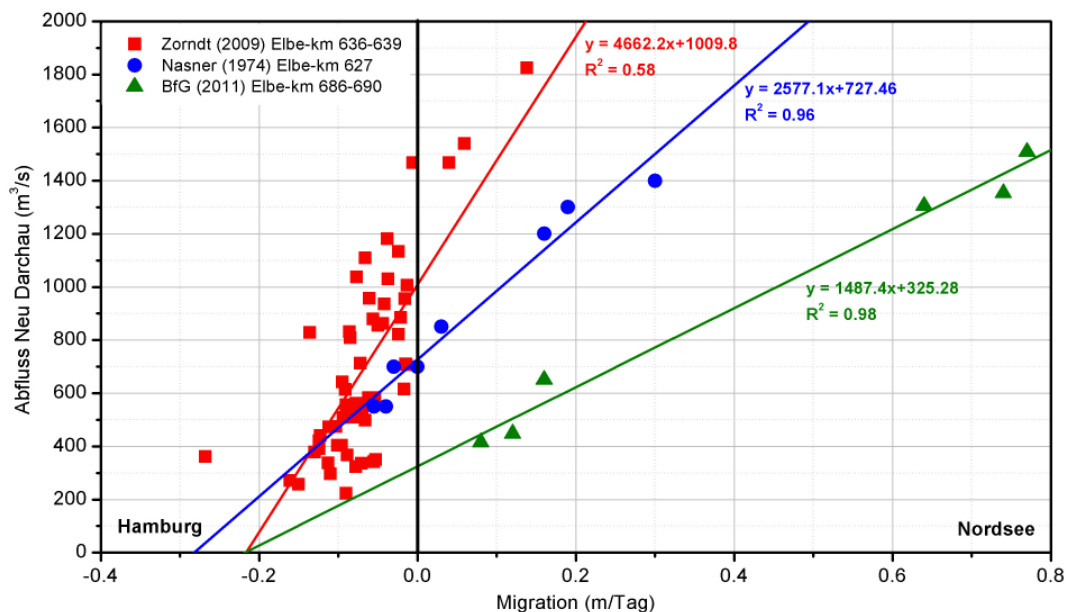


Abbildung 25: Dünenmigration in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses bei Neu Darchau aus den eigenen Auswertungen und aus Literatur von Nasner (1974) und Zorndt (2009).

„KLIWAS-eigene“ Abflussprojektionen für den Oberwasserabfluss am Pegel Neu Darchau liegen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht vor. Diese werden zur Zeit durch das KLIWAS Projekt 4.01 erstellt und weitergehend ausgewertet. Dabei wird eine Methode zur Ableitung einer Szenarienfamilie für Klimavariablen sowie Abfluss bis zum Jahr 2100 entwickelt (Nilson & Maurer, 2010). In einem mehrstufigen Prozess werden eine Vielzahl von Szenarien mittels Modellen in die Zukunft projiziert, indem Ketten aus Emissionsszenarien, globalen und regionalen Klimamodellen und hydrologischen Modellen durchgespielt werden. Ergebnis wird eine Bandbreite von extremen Niedrig- und Hochwasserständen sein (Nilson & Maurer, 2010), die dann in Zusammenhang mit der hier vorgestellten Transportkörperdynamik betrachtet werden sollen.

Im Untersuchungsgebiet St. Margarethen wurden die sohlgebundenen Sedimentfrachten in Richtung Nordsee in der Fahrrinne im Jahr 2010 mit durchschnittlich 986 m³/s Oberwasserabfluss doppelt so hoch abgeschätzt als im Jahr 2009 mit durchschnittlich nur 639 m³/s Oberwasserabfluss (am Pegel Neu Darchau). In einer ersten qualitativen Schätzung basierend auf den in Abbildung 25 gezeigten Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass längere und extremere Niedrigwasserphasen beim Oberwasserabfluss zukünftig einen stromaufgerichteten sohlgebundenen Transport fördern werden, wohingegen bei hohen

Oberwasserabflüssen der sohlgebundene Transport von Sedimenten in Richtung Nordsee angeregt wird. Damit sind auch langfristig klimabedingte Veränderungen im (Grob-)Sedimenthaushalt der Tideelbe aufgrund eines veränderten Oberwasserabflussregimes zu erwarten.

6.2 Weitere klimasensitiven Einflussfaktoren

Der Oberwasserabfluss wurde (vgl. Kapitel 6.1 Einfluss Oberwassersituation auf Wanderungsgeschwindigkeit und Transportrichtung der Dünen) als eine erste „klimasensitive“ Randbedingung mit Einfluss auf den ästuarinen Sedimenthaushalt identifiziert. Zugleich wird Klimawandel stets auch im Zusammenhang mit dem Anstieg des Meeresspiegels (d.h. Veränderung von Tidekennwerten) und einer allgemeinen Erwärmung (d.h. höhere Wassertemperaturen) diskutiert. Bei den bisherigen Untersuchungen standen diese Faktoren bislang noch nicht im Fokus. Untersuchungen von Nasner (1974) haben jedoch gezeigt, dass unterschiedliche Wassertemperaturen keine Auswirkungen auf die Geometrie von Transportkörper in der Tideelbe und den sohlgebundene Geschiebetransport haben.

Im Untersuchungsgebiet St. Margarethen lagen die Dünenlängen bei durchschnittlich 50 m und die Höhen bei durchschnittlich 1,6 m, während im Untersuchungsgebiet Lühe die Dünen im Durchschnitt nur 32 m Länge und 1 m Höhe erreichten. Die Längen-Höhen-Beziehung in beiden Untersuchungsgebieten haben ergeben, dass die von Flemming (1988;2000) definierte Funktion für die maximale Transportkörperhöhe ab Dünenlängen von 25 m bei Lühe und Dünenlängen von 40 m bei St. Margarethen nicht mehr erreicht werden (vgl. Abbildung 10, Abbildung 18). Warum die Dünen nicht ihre maximal möglichen Höhen erreichen und warum die Dünen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen länger und höher werden als bei Lühe, kann unter anderem durch eine unterschiedliche Sedimentverfügbarkeit begründet werden. Flemming (2000) hat festgestellt, dass, je größer die Dünen werden, desto wahrscheinlicher wird es, dass nicht genügend Sediment zur Verfügung steht. Dies würde bedeuten, dass im Untersuchungsgebiet St. Margarethen grundsätzlich mehr Sediment geeigneter Fraktionen zur Verfügung steht als im Untersuchungsgebiet Lühe. Diese Aussage wird dadurch gestützt, dass im Untersuchungsgebiet St. Margarethen das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg neben der Fahrinne eine Verbringstelle für Unterhaltungsbaggertgut betreibt und damit kontinuierlich Sediment mit Grobkornanteilen in die Fahrinne eingetrieben werden kann. Dieses steht dann als zusätzliches Sediment zum Aufbau der Dünenkörper zur Verfügung. Dennoch werden auch bei St. Margarethen nicht die maximal möglichen Dünenhöhen erreicht. Ein weiterer limitierender Faktor der Dünenhöhe ist die Strömungsgeschwindigkeit. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten führen nach Nasner (1974) zu einer Erosion im Kammbereich und somit zu geringeren Transportkörperhöhen. Die Strömungsgeschwindigkeit variiert aber nicht nur entlang des Ästuars, sondern auch im Querschnitt, zum Beispiel aufgrund der Gewässermorphologie (Prall-Gleithang). Darauf kann die Variabilität der Dünendimensionen im Querschnitt zurückgeführt werden kann. In weiteren Grundlagenuntersuchungen sollte daher dieser Fragestellung des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeiten nachgegangen werden.

7. Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Methode des Dune Tracking mit der Anwendung der Software DT2D ein verlässliches Verfahren ist, um Geometrie und Dynamik der Transportkörper räumlich und zeitlich detailliert zu bestimmen, um daraus anschließend den Geschiebetransport zu berechnen und die Abhängigkeit von Randbedingungen und Einflussfaktoren zu analysieren. Der Einfluss der Oberwassersituation am Pegel Neu Darchau auf die Dynamik der Dünen im Untersuchungsgebiet St. Margarethen konnte ausführlich beschrieben werden. Die anfangs formulierte Hypothese des erkennbaren Wirkungszusammenhangs zwischen Oberwasserabfluss am Pegel Neu Darchau und Transportrichtung sowie Wandergeschwindigkeit der großen Transportkörper hat sich bestätigt. Zwischen der Geometrie der großen Transportkörper und dem Oberwasserabfluss konnte jedoch kein Zusammenhang beobachtet werden.

Für weitere Untersuchungen sind Fächerecholotungen mit höherer Auflösung zu bevorzugen, da diese auch die Detektion kleinerer Transportkörper und damit eine verbesserte Schätzung des Geschiebetransports ermöglichen. Daneben sollten Peilungen möglichst ein breites Spektrum verschiedener Oberwassersituationen abdecken. Zur Zeit wird die Auswertesoftware Dune Tracking 2D von der Universität Utrecht überarbeitet und benutzerfreundlicher gestaltet, um künftige Auswertungen zu vereinfachen.

Ergänzend zu den Peildatenauswertungen sollten ADCP-Messungen und Sedimentproben in den Untersuchungsbereichen gezielt ausgewertet werden. Damit sollen die Einflüsse der Strömungsgeschwindigkeiten, der Korngröße der Sedimente sowie ihrer Zusammensetzung auf die Transportkörper näher untersucht werden. Sowohl für die Entstehung von Transportkörpern als auch für die Variationsbreite ihrer Abmessungen ist neben den Strömungsgeschwindigkeiten im Kammbereich auch die genaue Kenntnis der Korngrößenzusammensetzung des Sohlmaterials erforderlich.

Danksagung

Dem WSA Hamburg und dem WSA Cuxhaven, in Person von Herrn Entelmann, Herrn Schwillo und Herrn Vaessen, sei für die Bereitstellung sämtlicher erforderlicher Daten gedankt. Der Hamburg Port Authority, in Person von Nino Ohle und Thomas Thies, für die kritische Betrachtung der Auswertungen und einigen anregenden Ideen in der Anfangsphase der Bearbeitungen.

Literatur

- ASHLEY, GAIL M. (1990): Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: A New Look at an Old Problem. *Journal of Sedimentary Research* 60, 161-172.
- BFG (2004): Feststofftransport und Flussbettentwicklung der Elbe. Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-1431), 1-55.
- BFG (2010): Untersuchungen zur Dynamik von Feststoffen und feststoffgebundenen Schadstoffen für den Verbringbereich bei Elbe-km 688/690 - Ergebnisse der Monitoringkampagnen vom Oktober 2008 und März 2009. Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-1691), 1-92.
- CARLING, P.A, GLAISTER, M., GÖLZ, E., REDECKI, A. & ROSENZWEIG, S. (1993): Untersuchung und numerische Modellierung von subaquatischen Dünen im Rhein bei Niederwalluf (Rheingau). Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-0774), 1-31.
- DGJ (2003): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. from http://www.dgj.de/index2.php?page=jahreshauptwerte.php&K1=&K2=12853&jahr=2003&jahr_typ=&M_GNAME=QBI
- FLEMMING, B.W. (1988): Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. *Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten* 29, 44-47.
- FLEMMING, B.W. (2000): The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. *Marine sandwaves dynamics*. Lille, Frankreich, 1-7
- FRINGS, R.M. (2010): Präsentation - Dune Tracking, Interner Fach- und Ideenaustausch. Bundesanstalt für Gewässerkunde, unveröffentlicht.
- FRINGS, R.M. & KLEINHANS, M.G. (2007): Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. In: R.M. Frings, (Hrsg.), *From gravel to sand. Downstream fining of bed sediments in the lower river Rhine*. Utrecht, Netherlands Geographical Studies, 57-94.
- GAEUMAN, D. & JACOBSON, R.B. (2007): Field Assessment of Alternative Bed-Load Transport Estimators. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1319-1328.
- KLIWAS (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen. 1. Zwischenbericht, Koblenz.
- KONGSBERG MARITIME GMBH (2011): Fächerecholot EM 3002. from http://www.kongsberg-simrad.de/deu/produkte/hydrographie/faecherlote/em3002/em3002_index.html.

- KRAFT, S. (2009): Modellierung der Verformung kohäsionslosen Materials durch turbulente Strömungen mit Hilfe der Level Set Methode. Universität Darmstadt, Dissertation, 1-119.
- MÖHL, S. (1996): Sedimenttransport im Bereich der Tide-Elbe. Formänderungen von Riffeln als Kennwert der Materialumlagerung. Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in Hamburg Band 86, 1-109.
- NASNER, H. (1974): Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der technischen Universität Hannover Heft 40, 1-149.
- NILSON, E. & MAURER, T. (2010): KLIWAS, Vorhaben 4: Erfassung der Veränderungen des hydrologischen Systems: Sedimenthaushalt, Morphologie und Anpassungsoptionen für Schifffahrt und Wasserstraßen. from http://www.kliwas.de/cln_005/nn_594076/KLIWAS/DE/03__Vorhaben/04__vh4/vh4__node.html?__nnn=true.
- TEN BRINKE, W.B.M., WILBERS, A.W.E. & WESSELING, C. (1999): Dune growth, decay and migration rates during large-magnitude flood at sand and mixed sand-gravel bed in the Dutch Rhine river system. Special Publication of the International Association of Sedimentologists 28, 15-32.
- TERWINDT, J.H.J. (1970): Observation on submerged Sand Ripples with Heights ranging from 30 to 200 cm occurring in Tidal Channels of S.W. . Geologie en Mijnbouw 49 (6), 489-501.
- VAN RIJN, L.C. (1993): Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Part I. Amsterdam, Aqua Publications, 1-715.
- VOLLMER, S. & SCHRIEVER, S. (2005): Feststoffhaushalt der Elbe. Feststoffhaushalt und Sedimentbewirtschaftung - anthropogene Steuerung natürliche Prozesse? Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 25-36.
- VOLLMERS, H. & WOLF, G. (1969): Untersuchung von Sohlenumbildungen im Bereich der Unterelbe. Die Wasserwirtschaft, Heft 10, 292-297.
- WENZ, D. (2008): Seevermessung. Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven. 08. August 2008, from http://www.wsa-bremerhaven.de/bau_und_unterhaltung/seevermessung/index.html.
- WESSELING, C. & WILBERS, A.W.E. (2000): Handleiding DT2D versie 2.3. Software voor dune-tracking in twee dimensies. Manual. Utrecht, 1-24.
- ZORNNDT, A. (2009): Einfluss hydrodynamischer Randbedingungen auf die Mobilität von Transportkörpern in der Tideelbe bei Hamburg. Leibniz Universität Hannover, Diplomarbeit, 1-126.